

Resum

En aquest treball s'estudien diferents configuracions en l'esquema elèctric d'un centre de dades amb l'objectiu de trobar quina de les propostes plantejades és millor en termes d'eficiència energètica.

Així, s'explica què s'entén per centre de dades, quines són les diferents topologies o rangs que pot presentar l'esquema elèctric d'aquest tipus d'edificis i quins models aproximats es dissenyen per a poder analitzar les línies de distribució.

El punt de millora en que es basarà l'estudi és la compensació de la potència reactiva i les pèrdues que es generen degut al mètode de compensació en l'esquema elèctric.

La primera idea seria eliminar els dispositius físics auxiliars que provoquen pèrdues extres al sistema e intentar reduir la potència reactiva amb un altre mètode. Es per això que es modelitzen quatre escenaris. El primer escenari correspon al esquema elèctric eliminant els dispositius de compensació. El segon correspon a l'escenari clàssic amb dispositius auxiliars. El tercer és el disseny d'un nou llaç de control i el quart és la combinació entre el llaç de control i els dispositius.

S'efectuarà l'estudi en dues etapes. Primerament en termes d'eficiència del consum energètic i, sobre la opció més eficient, es realitzarà l'estudi econòmic en quant a l'estalvi en la tarifació elèctrica i el cost del sistema.

Es considera que els resultats obtinguts són concloents ja que s'ha trobat que en el cas de la combinació del llaç de control i els dispositius ha esdevingut sensiblement més eficient que la resta. Per altre banda, en l'anàlisi econòmic es demostra que és una mesura rentable, però, no per a totes les tipologies de centres de dades.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
SUMARI DE FIGURES	5
SUMARI DE TAULES	7
1. GLOSSARI	9
2. PREFACI	10
2.1. Origen del projecte	10
2.2. Motivació	10
3. INTRODUCCIÓ	13
3.1. Objectius del projecte	13
3.2. Abast del projecte	14
4. PRESENTACIÓ DELS CENTRES DE DADES	16
4.1. Una mica d'història	16
4.2. Classificació dels centres de dades	18
4.2.1. TIER 1	18
4.2.2. TIER 2	22
4.2.3. TIER 3	23
4.2.4. TIER 4	25
4.3. Mètriques per estimar l'eficiència energètica	26
5. FORMULACIÓ DE LA PROBLEMÀTICA	29
5.1. Sobredimensionat del convertidor AC/DC per a regular potència reactiva ..	30
6. MODELITZACIÓ DE L'ESQUEMA ELÈCTRIC	33
6.1. Convertidor costat xarxa de la UPS AC/DC	34
6.2. Modelització del cablejat	38
6.3. Modelització de la xarxa	40
6.4. Modelització de les proteccions	40
6.5. Modelització del transformador	42
6.6. Modelització de les càrregues mecàniques	45
6.7. Modelització dels elements de compensació de reactiva	47
7. MODEL DEL CONTROL	49

7.1. Control del convertidor sense reactiva.....	49
7.2. Control del convertidor amb compensació de reactiva	53
8. CONSIDERACIONS I PLANTEJAMENT DE SIMULACIONS _____	60
8.1. Compensació amb banc de condensadors	63
8.2. Compensació amb control de potència reactiva	64
8.3. Compensació amb banc de condensadors i control de reactiva	65
9. ESTUDI DE LA MILLORA EN L'EFICIÈNCIA _____	66
9.1. Anàlisi del TIER 1	66
9.2. Anàlisi del TIER 2	70
9.3. Anàlisi del TIER 3	73
9.4. Anàlisi del TIER 4	75
10. ANÀLISIS ECONÒMIC COMPARATIU PER TOTS ELS TIERS _____	77
10.1. Anàlisi de no tenir compensació a tenir condensadors	78
10.2. Anàlisi d'implementar el control de reactiva	81
11. PLANIFICACIÓ TEMPORAL I COSTOS _____	86
CONCLUSIONS _____	89
AGRAÏMENTS _____	91
BIBLIOGRAFIA _____	92



Sumari de Figures

Figura 4.1 Topologia del sistema elèctric TIER 1	19
Figura 4.2 Esquema típic d'una UPS estàtica de doble conversió	21
Figura 4.3 Esquema típic d'una UPS rotativa	22
Figura 4.4 Topologia del sistema elèctric TIER 2	23
Figura 4.5 Topologia del sistema elèctric TIER 3	24
Figura 4.6 Topologia del sistema elèctric TIER 4	25
Figura 4.7 Consum elèctric per a un centre de dades real, octubre 2011	27
Figura 5.1 Estimacions del consum dels centres de dades del 2000 al 2010.....	30
Figura 5.2 Control de la potencia reactiva mitjançant la UPS.....	31
Figura 6.1 Esquema a modelitzar per a analitzar el concepte	33
Figura 6.2 Esquema elèctric del convertidor AC/CC a modelitzar	34
Figura 6.3 Esquema del AC/CC dissenyat amb IGBT	35
Figura 6.4 Circuit equivalent del filtre inductiu del convertidor	37
Figura 6.5 Model en π d'una línia trifàsica sense component capacitiva.....	39
Figura 6.6 Esquema elèctric dels interruptors de protecció	41
Figura 6.7 Esquema comparatiu d'una distribució en AC i DC.....	42
Figura 6.8 Connexió en triangle-estrella 11 del transformador	43
Figura 6.9 Esquema equivalent d'una fase d'un transformador triangle-estrella	44
Figura 6.10 Connexió en triangle-estrella 11 del transformador	45
Figura 6.11 Esquema d'un VFD amb les formes d'ona de la tensió al dispositiu	46
Figura 6.12 Esquema equivalent d'una STATCOM.....	47

Figura 7.1 Diagrama de blocs del control sobre el corrent	51
Figura 7.2 Diagrama de blocs del control sobre la tensió del bus DC	53
Figura 7.3 Esquema per fase des de la xarxa al convertidor AC/DC.....	54
Figura 7.4 Esquema simplificat per fase des de la xarxa al convertidor AC/DC	54
Figura 7.5 Diagrama de blocs del control sobre el corrent dissenyat	58
Figura 7.6 Diagrama de blocs del control sobre la tensió del bus DC dissenyat	59
Figura 8.1 Esquema elèctric resum de les alternatives de compensació	60
Figura 8.2 Potència consumida al bus DC per a un TIER 1 tipus HPC i tipus web	62
Figura 8.3 Demanda dels motors de refrigeració per a un TIER 1	63
Figura 9.1 Potència Reactiva en la simulació d'un dia en un TIER 1 tipus web	67
Figura 9.2 Potència Reactiva en la simulació d'un dia en un TIER 1 tipus HPC	68
Figura 9.3 Eficiència en un TIER 1 tipus web en mig dia de simulació.....	69
Figura 9.4 Eficiència en un TIER 1 tipus HPC en mig dia de simulació.....	69
Figura 9.5 Eficiència en un TIER 2 tipus web en mig dia de simulació.....	72
Figura 9.6 Eficiència en un TIER 2 tipus HPC en mig dia de simulació.....	72
Figura 9.7 Eficiència en un TIER 3 tipus web en mig dia de simulació.....	74
Figura 9.8 Eficiència en un TIER 3 tipus HPC en mig dia de simulació.....	74
Figura 11.1 Diagrama de Gantt del projecte.....	88



Sumari de Taules

Taula 6.1 Estimació de la potència perduda al convertidor	36
Taula 8.1 Potència consumida als servidors i Potència al bus DC	62
Taula 9.1 Principals resultats d'un TIER 1 sense compensació de reactiva.....	67
Taula 9.2 Increment d'eficiència en % en un TIER 1	70
Taula 9.3 Principals resultats d'un TIER 2 sense compensació de reactiva.....	71
Taula 9.4 Increment d'eficiència en % en un TIER 2.....	73
Taula 9.5 Principals resultats d'un TIER 3 sense compensació de reactiva.....	73
Taula 9.6 Increment d'eficiència en % en un TIER 3.....	75
Taula 9.7 Principals resultats d'un TIER 4 sense compensació de reactiva.....	76
Taula 9.8 Increment d'eficiència en % en un TIER 4.....	76
Taula 10.1 Facturació bàsica sense compensació vs. condensadors.....	79
Taula 10.2 Bonificació sense compensació vs. condensadors.....	80
Taula 10.3 Balanç econòmic entre la opció sense compensació vs. amb condensadors	81
Taula 10.4 Facturació bàsica condensadors vs. condensadors i llaç de control.....	82
Taula 10.5 Bonificació condensadors vs. condensadors i control	83
Taula 10.6 Balanç econòmic de la opció condensadors vs. condensadors i control	84
Taula 11.1. Estimació de l'amortització de l'equipament utilitzat	86
Taula 11.2. Resum pressupost del projecte	87

1. Glossari

DC: "Direct Current" / corrent continua

AC: "Alternating Current" / corrent alterna

UPS: "Uninterruptible Power Supply"

TIER: rang o classe de centre de dades reconegut pel Uptime Institute

TIC o IT: "Information Technology"

PDU: "Power Distribution Unit"

PUE: "Power Usage Effectiveness"

FACTS: "Flexible Alternating Current Transmission System"

STATCOM: "Static Synchronous Compensator"

MOSFET: "Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor"

BJT: "Bipolar Junction Transistor"

IGBT: "Insulated Gate Bipolar Transistor"

SVPWM: "Space Vector Pulse Width Modulation"

MT: Mitja Tensió

BT: Baixa Tensió

CRAC: "Computer Room Air Conditioner"

CRAH: "Computer Room Air Handler"

VFD: "Variable-Frequency Drive"

PI: Proporcional-Integral

HPC: "High-performance computing"

2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

Aquest projecte ha estat realitzat a l'Institut de Recerca en Energies de Catalunya (IREC) i correspon a una petita part del projecte europeu RenewIT [1]. El principal objectiu d'aquest projecte és desenvolupar una eina de simulació per avaluar l'eficiència de diferents solucions tècniques integrant diverses regions climàtiques d'Europa. Aquest projecte no només està desenvolupat al IREC sinó que hi ha un consorci de socis d'arreu d'Europa com l'empresa Loccioni o l'empresa especialitzada en centres de dades Deerns.

Dins del marc del projecte RenewIT, aquest document s'encabeix després d'una primera auditoria energètica on es van detectar les possibles oportunitats tècniques per a millorar l'eficiència d'un centre de dades, anomenats conceptes avançats.

Aquest projecte neix després del lliurable D4.3. del RenewIT [2] on s'escull un dels conceptes avançats presentats per estudiar-lo en profunditat i determinar de quina manera es pot obtenir una millora d'eficiència per a diferents centres de dades.

2.2. Motivació

La realització d'aquest projecte m'ha portat a assolir una gran quantitat d'habilitats transversals. Primerament, m'ha permès tenir una vertadera visió de com s'executa un projecte interdisciplinari en un centre de recerca. A més, escollir el tema d'aquest projecte ha estat una prova per a començar l'especialització a la que em matricularé pròximament al màster universitari en enginyeria industrial especialitat elèctrica.

Aquest projecte m'ha portat a assolir altres objectius com per exemple:

- Poder fer front a un projecte interdisciplinari amb suficient autonomia i responsabilitat com per a auto-plantejar els mètodes per a aconseguir l'objectiu proposat.
- Afrontar unes pràctiques externes a la universitat per a conèixer mètodes i entorns de treball utilitzats actualment en aquests centres d'investigació.
- Col·laborar amb investigadors i doctors de l'IREC experts en el sector.



- Adquirir coneixements sobre electricitat i electrònica de potència aprofitables per a futurs projectes.
- Afrontar unes pràctiques externes a la universitat per a conèixer mètodes i entorns de treball utilitzats actualment en aquests centres d'investigació.

3. Introducció

Així com les tecnologies de la informació (IT) són cada cop més predominants en la vida de les persones, els centres de dades són edificis que esdevenen cada cop més importants. Essent cada cop més necessari l'ús i l'emmagatzemament de grans quantitats de dades, aquest edifici ha esdevingut una pedra angular per a les empreses. La gran demanda d'energia que es necessita per a alimentar un centre de dades impulsa a buscar oportunitats per a fer-los més eficients.

Aquests problemes s'agreugen en un context que presenta el repte de l'escassetat de recursos i la necessitat d'alentir el canvi climàtic. D'acord amb la directiva 2012/27/UE [3] del parlament europeu, l'objectiu de la Unió Europea és estalviar un 20% del consum d'energia de la Unió al 2020 i aconseguir l'objectiu acordat al 2010 d'augmentar l'eficiència en un 20%. És per això que s'estan regularitzant protocols per la gestió i millora de la eficiència com la nova ISO-50001.

Actualment en aquests edificis s'utilitzen dispositius físics externs a la línia de distribució normal d'un centre de dades com a sistema per a millorar l'eficiència mitjançant la compensació de la potència reactiva consumida. Aquesta, però no és la única mesura que es pot adoptar per a millorar el rendiment de la instal·lació.

Altres estudis han analitzat la capacitat dels sistemes d'alimentació ininterrompuda (UPS) com a dispositius actius de compensació de la reactiva i la reducció d'harmònics [5] [6] o l'estudi del disseny modular d'aquests mateixos elements per fer-los treballar en un alt factor de càrrega.

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal en aquest projecte és estudiar la possible millora en l'eficiència energètica que es pot produir en un centre de dades implementant un control sobre la potència reactiva. Amb aquest control es pretén substituir els dispositius físics que s'utilitzen a l'actualitat per a aconseguir un millor factor de potència de la instal·lació i reduir les pèrdues energètiques.

Un segon objectiu que es deriva del primer és determinar si la implementació del control sobre el convertidor conjuntament amb els dispositius físics pugui millorar l'eficiència del

centre de dades, en el cas que l'estratègia d'implementar el control sobre el convertidor no sigui efectiva.

Un altre objectiu correspon a l'estudi dels avantatges econòmics que poden derivar de substituir els dispositius físics per alguna de les dues propostes esmentades anteriorment. Considerant possibles modificacions necessàries a l'esquema elèctric del centre de dades.

Per tal d'assolir aquets objectius cabdals, s'estableixen una sèrie d'objectiu específics. Aquests són:

- Entendre què és un centre de dades i la seva importància en termes energètics.
- Entendre el seu esquema elèctric i diferenciar entre tipus de centre de dades.
- Establir com es pot mesurar l'eficiència del centre de dades.
- Definir com es pot implementar el laç de control pel control de reactiva.
- Construir un model on poder comparar les alternatives a estudiar.
- Valorar els resultats obtinguts per a donar solució als objectius principals.

3.2. Abast del projecte

Per la pròpia funció del centre de dades on ha d'allotjar gran quantitat de computadors funcionant ininterrompudament, s'engloba una gran quantitat d'àrees i conceptes on poder estudiar una possible millora de l'eficiència energètica. Per a poder estudiar un edifici com aquest es pot separar l'estudi de millora de l'eficiència en dos grans blocs de conceptes: els tèrmics i els elèctrics. En aquest projecte només ens fixarem en un concepte molt concret de caire elèctric deixant de banda conceptes tèrmics que inclouen el control i disseny del sistema de refrigeració.

Per tal de millorar el rendiment de la instal·lació variant el circuit elèctric de l'edifici, també hi ha diferents fronts per on poder realitzar l'estudi. Algunes de les propostes dintre dels conceptes elèctrics que es poden estudiar són: el disseny de línies de distribució en corrent continua (a partir d'ara DC) en comptes de en corrent alterna (AC) o l'estudi del potencial d'utilitzar eficientment un "bypass" per la UPS. En aquest projecte, de tots els possibles conceptes que es podrien introduir, es pretén avaluar la millora potencial en l'eficiència



energètica d'un centre de dades adoptant un control que permeti l'intercanvi de potència reactiva en el convertidor vessant xarxa de la UPS, AC/DC.

Aquest estudi abastarà la comparació en l'eficiència que es pot tenir en el centre de dades sense cap dispositiu de compensació de reactiva, amb un dispositiu físic actual, amb el control de reactiva proposat i amb una combinació del control amb els dispositius físics. L'anàlisi es realitzarà per diferents rangs de centres de dades o TIERs, que s'explicaran més endavant, i per a demandes de potència dels servidors: constant o variable. Aquestes demandes de potència corresponen a un funcionament d'un centre de dades del tipus HPC (High performance Computing) o d'un servidor web, respectivament.

4. Presentació dels centres de dades

Els centres de dades exerceixen un paper crític en la capacitat d'expansió de les empreses i són una peça clau en la tecnologia de programari ("software") modern. Atès que les empreses fa només unes dècades es basaven en mètodes de documentació tradicionals que són més propensos a errors, com la documentació a mà en paper; els centres de dades van millorar enormement la capacitat d'ús de les dades en el seu conjunt. Aquests edificis han permès a les empreses fer molt més amb molt menys, tant en termes d'espai físic com de temps necessari per a crear i mantenir dades [7].

Es defineix centre de dades, definició recollida a la referència [8] de l'agència de protecció ambiental dels Estats Units ("U.S. Environment Protection Agency"), com:

- Principalment equip electrònic utilitzat per el processament de dades (servidors), emmagatzematge de dades (equips d'emmagatzematge) i comunicacions (equips de xarxa). Col·lectivament, aquests equips processen, emmagatzemen i transmeten informació digital.
- Equips de conversió d'energia i de suport especialitzats en mantenir potència d'alta qualitat i fiable, així com equips de control ambiental per mantenir la temperatura i humitat adequades per als equips TIC (tecnologies de la informació i de la comunicació, també IT).

En definitiva és un edifici usat per a confinar equips IT i associats, així com sistemes de telecomunicacions i emmagatzematge, per mantenir-los en un entorn òptim pel seu funcionament ininterromput. Aquesta instal·lació pot tenir redundàncies en les UPSs, les connexions per transmetre dades, controls ambientals i en dispositius de seguretat.

4.1. Una mica d'història

Per a situar els centres de dades en la història, primerament, caldrà remuntar-se a 1946 quan l'armada dels Estats Units va produir el primer ordinador electrònic digital del món, el ENIAC [9]. Aquest i altres ordinadors que es van crear a partir del primer, eren grans ordinadors centrals confinats en habitacions, que és el que avui anomenem centre de dades.

Durant els anys posteriors, 1960 i 1970, van haver-hi importants avenços que van portar a la



millora dels elements que conformaven els ordinadors, permetent que fossin més compactes i que es reduís tant el seu cost com el consum. Exemples d'aquests avenços són, per exemple, al 1961 la invenció del primer transistor i primer circuit integrat disponible o al 1971 la invenció del primer microprocessador, l'Intel 4004 [10].

Amb tots els avenços en aquestes dècades i pel fet que els ordinadors centrals necessitaven una refrigeració especial, els ordinadors refrigerats per aire van passar a les oficines i, en conseqüència, els primers centres de dades van quedar en desús. Amb el microcomputador, la indústria de la computació va experimentar un fort apogeu i les operacions de les tecnologies de la informació eren cada cop més complexes, fent necessari que s'introduís un control dels recursos IT.

Els centres de dades tornen a aparèixer quan els microcomputadors (ara anomenats "servidors") comencen a tenir un lloc a les antigues sales d'ordinadors. Les companyies van invertir en servidors gràcies a la disponibilitat de xarxes barates i nou cablejat estructural [11].

El següent apogeu dels centres de dades es va donar a la era "dot-com" a finals de la dècada de 1990 i principis del 2000. També coneguts els centres de dades tradicionals com a centre de dades en sitges ("siloeed data center"). El ràpid increment de les pàgines web i aplicacions van necessitar magatzems físics on contenir la gran quantitat de dades necessàries per a poder executar aquests programes a tota la demanda dels usuaris [7].

Entre 2003 i 2010, van sorgir els centres de dades virtuals en ànim d'englobar els recursos de computació, xarxa i emmagatzematge de diversos centres de dades en sitges en i crear un recurs més flexible i centralitzat. Amb la tecnologia de la informàtica en núvol, aquest concepte comença a agradar tant a empreses com a consumidors per la gran flexibilitat que ofereix amb la mateixa estructura que existia abans de la virtualització dels servidors.

S'introdueix la infraestructura de software-led (SLI) amb l'objectiu de treure profit de la tecnologia de virtualització per beneficiar-se d'un centre de dades virtual alhora que permet la portabilitat, funcionalitat, emmagatzematge i l'automatització d'aplicacions tant dins com entre els centres de dades.

SLI es troba encara en una etapa primerenca, però es considera el següent pas en l'evolució dels centres de dades, la virtualització i la informàtica en núvol. Amb la combinació de la virtualització dels servidors, les xarxes definides per software (SDN),

l'emmagatzematge definit per software (SDS) i l'automatització permetran la creació d'un vertader centre de dades dinàmic i virtual.

4.2. Classificació dels centres de dades

Hi ha diverses maneres de classificar els centres de dades, entre d'altres: per la potència consumida o per la disponibilitat de temps de treball (EN 50600 o TIA-942 [12]).

En aquest projecte escollirem la classificació que ens proposa l'Uptime Institute amb el TIA-942 on ens compara la funcionalitat, capacitat i el cost relatiu d'una topologia de disseny estructural amb una altre. Aquesta classificació ens divideix els centres de dades en quatre topologies o TIERs.

Seguidament es presentaran els TIERs, ordenats per ordre de temps de treball del 1 al 4, i el seu esquema estructural. Es comentarà els diferents elements que conformen cada topologia així com les diferències que es troben al passar d'un nivell a un altre.

4.2.1. TIER 1

És l'estructura més bàsica d'un centre de dades. Aquesta estructura no té cap redundància en els seus components així com tampoc en té en la seva línia de distribució que alimenta els computadors.

Les operacions planejades, com el manteniment, requeriran de l'apagada de la majoria o tota la infraestructura, afectant, per tant, a equips de computació i usuaris finals. Una fallada o operació no planificada en qualsevol element de la línia de distribució tindrà un impacte als equips de computació. Ha de tenir la suficient capacitat per satisfer les necessitats del lloc. Es pot veure a la Figura 4.1 l'estructura d'aquest TIER [12]. El circuit bàsic està format per un transformador, un generador dièsel de suport, les càrregues mecàniques no crítiques, una UPS, una unitat de distribució de potència (o PDU), els computadors i els quadres de proteccions per a poder tallar el circuit en cas que sigui necessari.



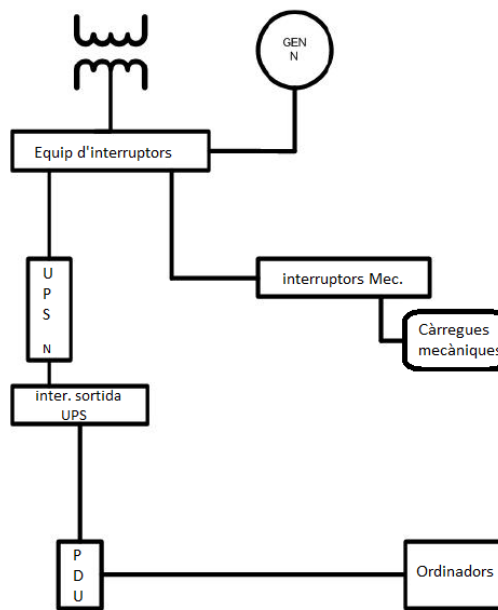


Figura 4.1 Topologia del sistema elèctric TIER 1

Com podem veure a la Figura 4.1, només existeix una línia de distribució sense redundàncies i l'alimentació es transmet normalment per corrent alterna trifàsica. Com els ordinadors s'alimenten amb corrent continua, estan equipats amb un rectificador electrònic AC/DC. També es pot apreciar que a la sortida de la UPS només estan connectades les càrregues crítiques perquè aquestes es mantindran sempre funcionant en cas de fallada de la xarxa. Les càrregues connectades abans de la UPS quedaran sense alimentació en cas de fallada de la xarxa. Les càrregues mecàniques, per exemple, no s'alimentaran instantàniament per la UPS en cas de fallada i per això no són crítiques, però estaran alimentades pel generador dièsel de suport quan aquest estigui operatiu. En altres configuracions de TIER 1, part de les càrregues mecàniques poden estar alimentades per la UPS com , per exemple, l'equipament que permet l'apagada dels computadors abans que l'habitació s'escalfi massa per l'apagada del sistema de refrigeració.

En cas de fallada de la xarxa principal, un interruptor de protecció connecta el generador dièsel a l'esquema elèctric alimentant tant les càrregues crítiques com les que no ho són. Aquesta operació necessita d'un temps per que el generador estigui completament operatiu. Per això, primerament les càrregues crítiques són alimentades per la UPS durant uns minuts, normalment 15 minuts. El sistema de refrigeració pateix un petit sotrac que resulta

en una pèrdua de refrigeració temporal. Aquest TIER presenta un temps d'inactivitat d'unes 28,8 hores anuals que correspon a una disponibilitat del 99,67% del temps total anual.

En condicions normals d'operació, el generador dièsel està desconnectat i les càrregues mecàniques estan directament alimentades per la xarxa principal. Per a protegir els computadors, el corrent és filtrat per la UPS i, per tant, és important anotar que la UPS està sempre connectada i subministrant energia.

La UPS és l'encarregada de proveir energia de suport quan hi ha una fallada de la xarxa o l'energia que proporciona és inservible per l'equipament. La UPS ha de subministrar l'energia necessària a les càrregues crítiques el temps suficient per a poder apagar satisfactòriament i no perdre cap dada en la fallada o fins que una altre font d'energia es posa en marxa [8].

La majoria de les diferents topologies de UPS també proporcionen condicionament de l'energia que arriba a les càrregues IT de manera que les comuns caigudes de tensions de la xarxa no puguin malmetre dispositius elèctrics o electrònics sensibles.

Generalment, hi ha dos classificacions: les estàtiques i les rotatives. Les més populars són les estàtiques que usen convertidors d'alguna tipologia d'interruptors electrònics, que converteixen direccionalment DC en AC, i un banc de bateries que s'usen per alimentar les càrregues crítiques. Una segona classificació de la UPS les separa en conversió única o doble conversió. En les de conversió única la potència en AC s'usa directament per a alimentar les càrregues crítiques, tot i que ha d'haver-hi algun regulador del voltatge per a reduir-lo o incrementar-lo a un valor acceptable per a l'equipament IT. És usual que presentin un inductor o un transformador per a proporcionar aïllament galvànic i protecció de transitoris entre la línia i la càrrega. A més, ha de tenir un circuit separat de recàrrega de la bateria per a que aquesta es mantingui sempre carregada per a que pugui alimentar les càrregues en cas d'una fallada.



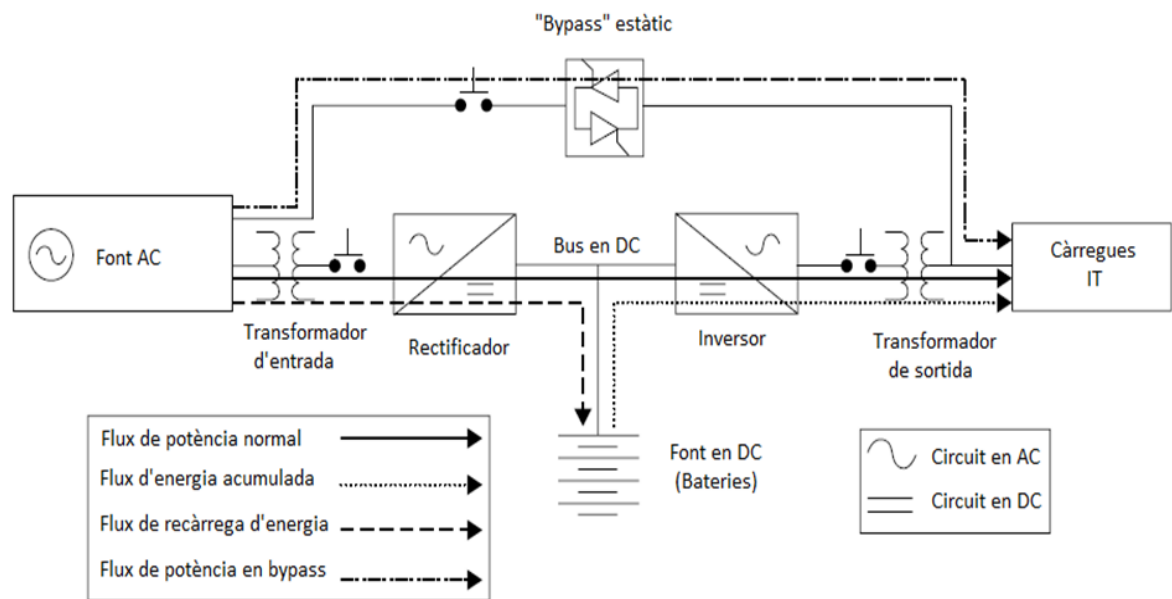


Figura 4.2 Esquema típic d'una UPS estàtica de doble conversió

Les UPS de doble conversió està compostes per un banc de bateries i dos convertidors. El primer és un AC/DC i el segon és un DC/AC, disposats en l'anomenat "back to back" enllaçats per un bus de continua on es connecten les bateries, Figura 4.2 [8]. Aquesta configuració transforma l'energia dues vegades i la sinusoide AC de la sortida de la UPS està completament controlada per a que les càrregues IT treballin correctament. La freqüència, però, és la mateixa que la de la xarxa de manera que la sinusoide de sortida es manté sincronitzada amb la freqüència de la font. És important aquest apunt ja que si la UPS necessita un canvi d'emergència al mode de "bypass", podria fer el canvi amb una tallada mínima de la potència assegurant que les càrregues crítiques no quedin interrompudes.

Com el sistema de doble conversió aïlla els corrents i tensions AC de la xarxa amb les noves ones generades per la UPS, són dispositius que s'han considerat com els que aporten més protecció. Típicament utilitzat per a xarxes de poca qualitat o de necessitat de qualitat extrema. Aquesta protecció addicional, però, comporta el preu d'incrementar els costos i disminuir l'eficiència d'operació. Aquest tipus de UPS és el que s'usa en centres de dades convencionals.

Les rotatives usen un equipament rotatiu que emmagatzema l'energia, un volant d'inèrcia per exemple, que alimenta en AC directament a la línia de distribució del centre de dades

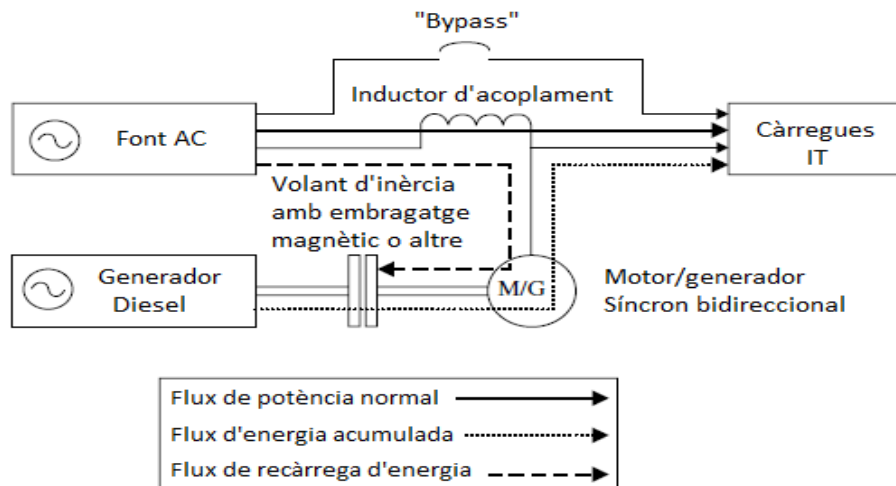


Figura 4.3 Esquema típic d'una UPS rotativa

mitjançant un motor síncron. A la Figura 4.3 [8] s'observen els elements que conformen una UPS rotativa. La característica d'aquest motor és que ha de ser bidireccional deixant que la potència flueixi des del volant d'inèrcia a la xarxa i a l'inrevés per a que pugui tant deixar anar com recarregar energia al volant. Típicament un equipament rotatiu pot proveir potència en AC en plena càrrega durant 5-15 segons, així que se li acobla un generador dièsel de suport per a aconseguir major temps de subministrament. Aquests dispositius solen ser dissenys d'alta potència i no serien un model acceptable en centres de dades petits, però es poden fer un lloc en els d'alt requeriment de potència. En ànim de deixar de banda les bateries de plom per substituir-les per alguna alternativa d'emmagatzematge d'energia, com el volant d'inèrcia, s'està variant l'esquema típic d'una UPS rotativa. Aleshores el dispositiu rotatiu proporcionaria directament potència en DC que després és convertida en AC pel convertidor propi d'una UPS estàtica.

4.2.2. TIER 2

La millora del TIER 2 respecte del TIER 1 es pot apreciar a la Figura 4.4 [12]. Aquesta estructura té redundàncies en els components de capacitat (UPS i generador dièsel), però no en té en la línia de distribució que connecta la xarxa amb els computadors. En comparació amb l'anterior, aquest presenta un temps d'inactivitat de 22 hores anuals; un 99,75% de disponibilitat del temps anual.

Els components de capacitat redundants poden ser retirats en operacions planejades sense



necessitat de cap apagada dels equips IT. En canvi, en no haver-hi redundàncies en la distribució, en fer una operació de manteniment en elements no redundants cal una apagada dels computadors. Tant les fallades en els components de capacitat o de distribució tenen un impacte als servidors.

Encara que s'introdueixen les redundàncies en les UPSs i generadors, el centre encara és susceptible a interrupcions per a operacions tant planificades com no planificades. La infraestructura ha d'apagar-se completament per a realitzar un manteniment preventiu de manera segura. Si aquest manteniment preventiu no es realitzés, s'incrementaria el risc d'interrupcions no programades i fallades.

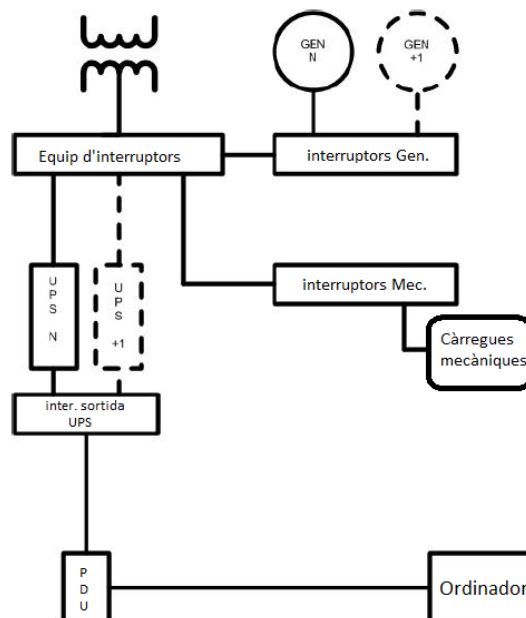


Figura 4.4 Topologia del sistema elèctric TIER 2

4.2.3. TIER 3

A la Figura 4.5 [12] es veu la topologia d'aquest TIER. La principal diferència amb les altres dos configuracions és que s'afegeixen redundàncies en el punt de connexió amb la xarxa elèctrica, la línia de distribució. Els components de capacitat segueixen presentant les mateixes redundàncies que en el segon TIER per evitar la desconexió dels servidors en cas de fallada d'algun d'aquests components. Aquesta nova redundància disminueix el temps inactiu del centre passant a ser de 1,6 hores anuals. Disponibilitat de 99,98% del temps anual.

Quant en els dos nivells anteriors només hi ha una línia de distribució, en aquest TIER s'afegeix un segon punt de connexió amb la xarxa doblant les línies de distribució del centre de dades. Totes les càrregues IT estan doblement alimentades i instal·lades convenientment per ser compatibles amb aquest tipus de topologia. El centre de dades ha de tenir suficient capacitat per a satisfer les necessitats de les càrregues encara que s'extinguin les redundàncies del sistema de distribució. A més, en aquesta tipologia només una de les branques està activa a la vegada i, per tant, cada branca de distribució ha de poder subministrar tota la càrrega demandada individualment per si una de les dues fallés.

L'edifici és capaç de mantenir-se en funcionament amb normalitat enfront a operacions programades de manteniment o reemplaçament d'algun element de la línia de distribució i de components de capacitat. Durant aquestes operacions, però, el risc d'interrupcions és elevat ja que s'està utilitzant la segona línia de distribució on no hi ha UPSs.

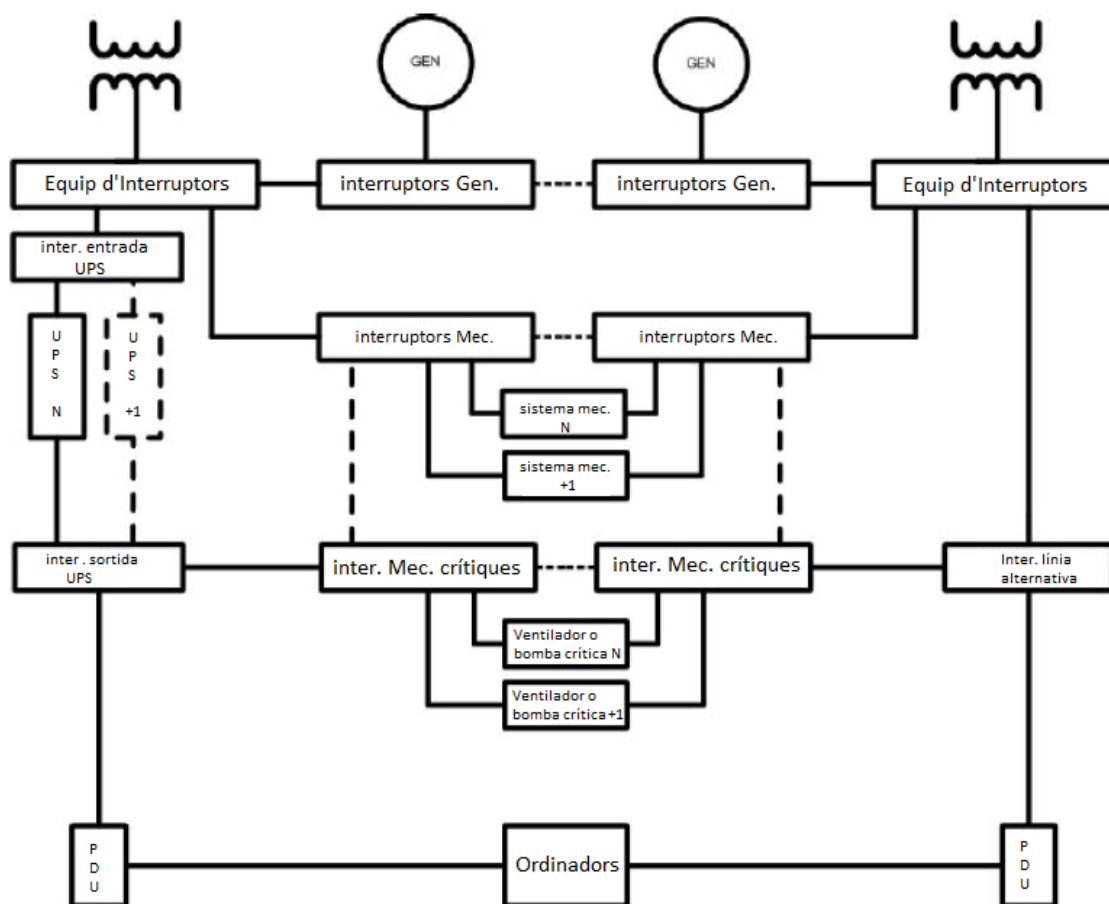


Figura 4.5 Topologia del sistema elèctric TIER 3



En canvi, l'estructura és susceptible a interrupcions per fallades o esdeveniments no planificats com pot ser una fallada de la xarxa o una fallada en algun component de capacitat. Qualsevol d'aquestes fallades tindrà un efecte sobre les càrregues crítiques.

4.2.4. TIER 4

Aquest és l'únic TIER capaç de suportar esdeveniments no planejats, com una fallada en algun element de la línia de distribució, però només és capaç de suportar una fallada simultàniament. Això és possible, com es veu a la Figura 4.6 [12], gràcies a col·locar elements de capacitat en la línia redundant de distribució i que el centre de dades treballa amb les dues línies actives. Aquest TIER té el temps d'inactivitat més baix, només 0,8 hores anuals, que correspon a una disponibilitat del 99,99% del temps anual.

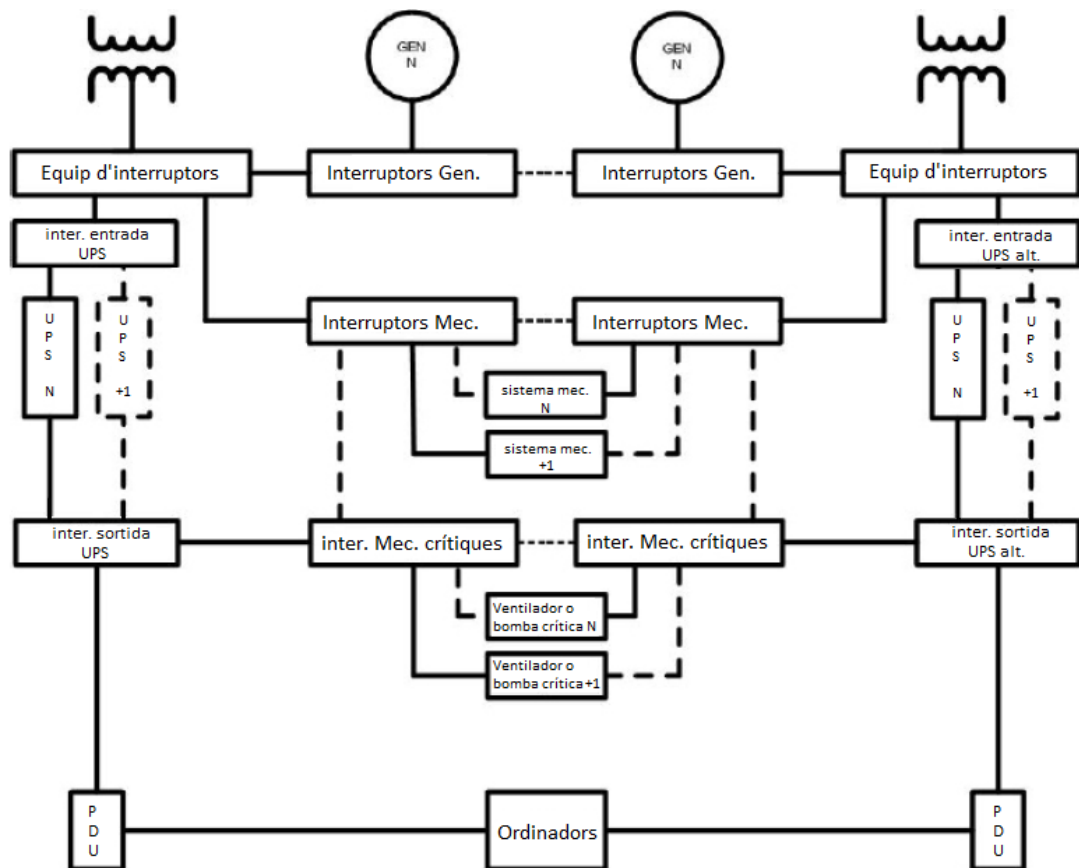


Figura 4.6 Topologia del sistema elèctric TIER 4

Per a aquesta estructura cada element de les línies de distribució o component de capacitat pot ser retirat en una operació planejada sense causar cap impacte en l'equipament informàtic. Durant les operacions de manteniment, quan una de les línies està apagada, els equips estan exposats a un major risc de interrupció per a l'altre línia. El fet de treballar amb dues línies simultàniament provoca que els dispositius treballin en baixa càrrega de treball i que el rendiment d'aquests baixi.

Aquesta topologia no és susceptible a interrupcions per a un sol esdeveniment no planejat simultàniament. A més, el sistema per ell mateix respon automàticament a una fallada per a prevenir un impacte major.

4.3. Mètriques per estimar l'eficiència energètica

Per a poder comparar o controlar l'eficiència del centre de dades caldrà que aquesta es pugui mesurar d'alguna manera. Per tant, és necessari una mètrica que en permeti la mesura. El "Power Usage Effectiveness" (PUE, eficàcia del consum energètic) ha esdevingut actualment, per la indústria, la mètrica preferida per a mesurar l'eficiència energètica per centres de dades [13].

El PUE es defineix com la relació de l'energia total consumida pel centre i l'energia consumida pels equips IT. L'energia total consumida pel centre es defineix com l'energia consumida en el punt de connexió amb la xarxa mentre que l'energia consumida pels equips IT es defineix com l'energia consumida exclusivament per l'equipament que s'utilitza per gestionar, processar, emmagatzemar o conduir dades dins de l'espai de càlcul.

$$PUE = \frac{\text{Energia Total del centre}}{\text{Energia dels equips IT}} \quad (4.1)$$

Aquesta mètrica dona una manera de determinar:

- Oportunitats per millorar l'eficiència de les operacions d'un centre de dades.
- Comparar centres de dades similars
- Si els operadors del centre estan millorant els dissenys i processos en el temps
- Oportunitats per reutilitzar l'energia per equips IT addicionals
- Una meta o objectiu de disseny per a nous centres de dades



El valor d'aquesta mètrica, per definició, serà sempre més gran que la unitat on aquest és el valor d'un centre de dades ideal ja que significaria que tota la potència consumida de la xarxa arriba a les càrregues IT sense pèrdues i cap necessitat de refrigeració. Segons el departament d'energia dels Estats Units (DOE) el PUE mitjà per centres de dades es de 1,75 [14]. Concretament, un centre de dades anomenat 50B-1275, ha evolucionat des del 1,65 calculat al 2009, al 1,47 del 2012. Aquesta dada ens donarà una referència de si el model de centre de dades que dissenyem s'assembla a un de real o no. Tot i això, a vegades es difícil estimar exactament el consum de les càrregues IT i les empreses no estan interessades en ensenyar quant d'eficients són. Per això, a vegades s'adopten altres mesures com la potència a l'entrada o sortida de la UPS per determinar el PUE. Tot i que aquests valors no siguin els que determina la mètrica. Per això es considera que el PUE real d'un centre de dades pot estar comprés entre 1,6 i 2. A la Figura 4.7 [14] es veu les dades amitanades del consum d'un centre de dades real a l'octubre de 2011.

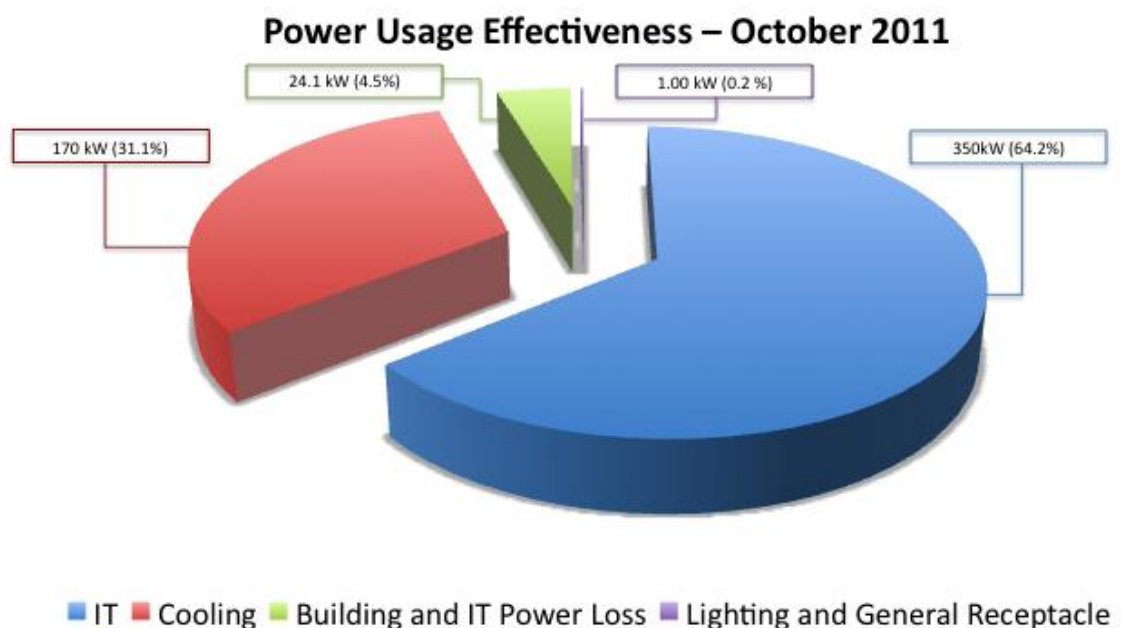


Figura 4.7 Consum elèctric per a un centre de dades real, octubre 2011

Una altre manera de mesurar l'eficiència de l'edifici és determinar una potència útil i dividir-la per la total consumida pel centre de dades al punt de connexió a la xarxa. Com es veurà a més endavant, per a complir els objectius d'estudi d'aquest projecte només caldrà modelitzar l'esquema elèctric del centre de dades fins al bus de continua de la UPS estàtica de doble

conversió. Per tant, si es considera com a potència útil la que travessa el bus de continua i la potència mecànica que han de realitzar els motors del sistema de refrigeració, la divisió de tot aquest sumatori de potències amb la consumida de la xarxa pot donar un altre valor de referència de l'eficiència en aquest estudi.

$$\text{Eficiència [pu]} = \frac{\text{Potència al bus [W]} + \text{Potència mecànica [W]}}{\text{Potència consumida de la xarxa [W]}} \quad (4.2)$$



5. Formulació de la problemàtica

Els centres de dades han esdevingut importants i és una instal·lació en augment a causa de la generalització i, per tant, increment de demanda de nous serveis d'internet com poden ser servidors web, de telefonia o noves xarxes socials.

Un exemple d'aquest creixement es mostra en que l'electricitat que es destinava a aquest tipus d'edificis es va doblar al període 2000-2005, atribuïble en la seva majoria a l'increment del volum de servidors [15]. A causa de la crisi econòmica i la introducció d'estudis en eficiència energètica, l'ús d'electricitat durant el període de 2005-2010 no s'incrementa com es va preveure. Aquest increment és significativament més baix que en el període anterior, però, el volum de servidors instal·lats i l'ús de l'electricitat destinada a aquest servei segueix creixent. A la Figura 5.1

[16] es pot observar que l'energia utilitzada a aquest tipus d'edifici al 2005 era del 1% de tot el consum mundial d'electricitat. A més a la figura es mostren les previsions de l'energia consumida al 2010: les fetes al 2005 considerant el mateix creixement que en el període de 2000 a 2005, unes segones previsions que es van fer al 2007 i un rang de valors d'on realment es trobava el consum d'electricitat mundial en centres de dades al 2010. S'estima que a l'actualitat els centres de dades consumeixen al voltant d'un 2% de l'electricitat generada mundialment.

Com la finalitat dels centres de dades és mantenir-se sempre operatius, és un edifici que requereix de molta potència per a poder treballar i refrigerar-se adequadament en tot moment durant tot l'any; a diferència, per exemple, d'un edifici d'oficines. Per aquesta raó la demanda d'energia elèctrica d'aquests tipus d'edificis és alta i, a més, va en augment cada any [15]

[16].

Per tal de reduir l'energia que consumeixen els centres de dades, cal buscar mètodes o configuracions de la instal·lació que facin d'aquests edificis el més eficients possible. El projecte es centrarà en avaluar la millora de l'eficiència energètica variant aspectes del circuit elèctric d'un centre de dades. Per a poder satisfer aquest objectiu, s'anunciarà el concepte avançat elèctric en el que es centrarà l'estudi: el sobredimensionat de la UPS per a regular potència reactiva [2].

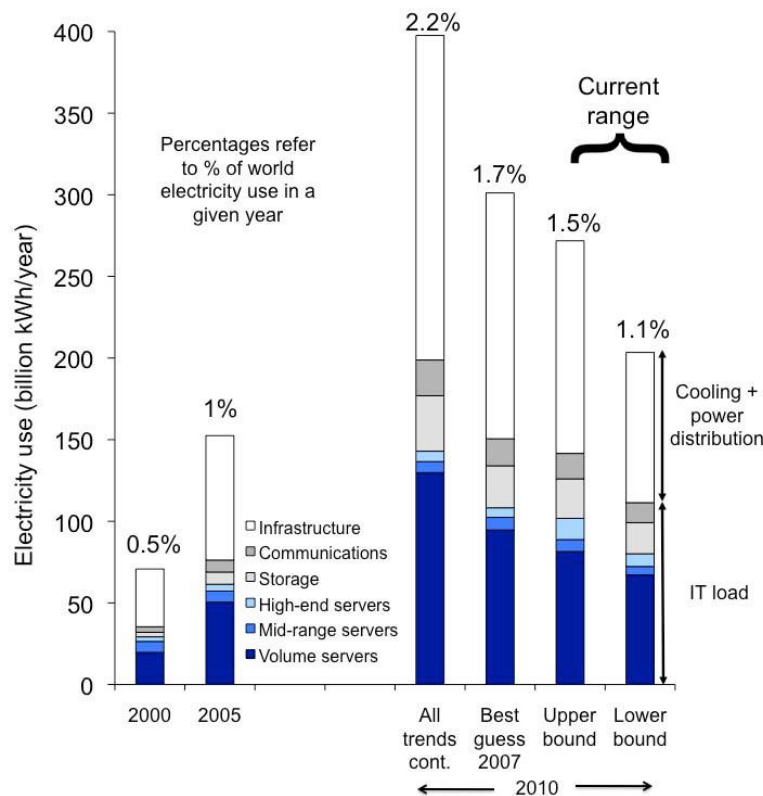


Figura 5.1 Estimacions del consum dels centres de dades del 2000 al 2010

5.1. Sobredimensionat del convertidor AC/DC per a regular potència reactiva

Els centres de dades inclouen altre equipament auxiliar a més dels dos comentats, les UPS i els generadors dièlsels. Aquest equipament té una funció diferent al d'alimentar el centre de dades en cas de fallada. La seva funció és vetllar per la compensació de reactiva en l'esquema elèctric i que s'obtingui un factor de potència adequat al punt de connexió de la instal·lació a la xarxa principal.

L'equipament encarregat de subministrar aquest servei en un centre de dades pot ser de dos tipus: un banc de condensadors, normalment modular, o utilitzar sistemes de transmissió flexible AC ("Flexible AC Transmission Systems", FACTS). Els FACTS normalment estan compostats per un convertidor controlat AC/DC i es col·loquen en paral·lel a l'esquema elèctric on es vol compensar la potència reactiva. Exemples d'aquest equipament que s'utilitza en aquests edificis és un compensador estàtic síncron ("Static



Synchronous Compensator", STATCOM).

Tenir un banc de condensadors, encara que estigui dissenyat de manera modula, no dona flexibilitat en el control del factor de potència ja que només es pot escollir dues posicions d'operació: poden estar connectades o desconnectades al sistema. En canvi, amb el control d'un STATCOM es pot aconseguir un control continu de la potència reactiva intercanviada amb la xarxa de manera que es pot aconseguir de manera més acurada una millora en el factor de potència. A més, la fiabilitat i la robustesa del sistema s'incrementa utilitzant STATCOMs en comptes de condensadors, per la necessitat de menys components passius.

Aquest concepte es basa en sobredimensionar el convertidor costat xarxa de la UPS per a que, a més de transmetre la potència necessària per les càrregues crítiques, sigui capaç de generar potència reactiva. En essència, es tracta de constituir el convertidor costat xarxa com una STATCOM per ell mateix, Figura 5.2 [2].

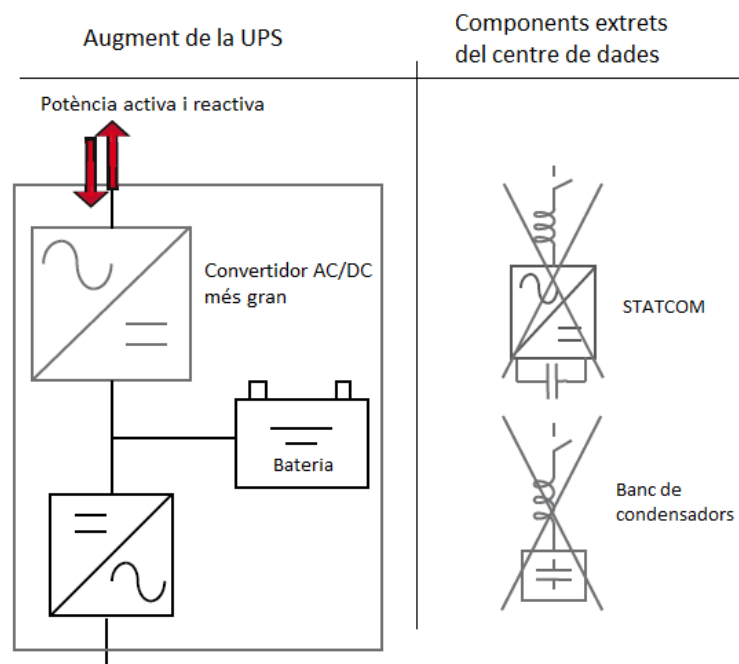


Figura 5.2 Control de la potència reactiva mitjançant la UPS

Aquesta estratègia pot comportar els següents avantatges potencials:

- Millora en la reducció de la distorsió harmònica, el que condueix a reduir pèrdues d'energia i temps de vida de l'equipament.
- Resposta molt ràpida per a regular la potència reactiva. La sortida del convertidor de potència pot canviar automàticament adaptant-se a canvis de les càrregues. A més, es poden eliminar problemes de ressonància.
- S'incrementa la robustesa del sistema, així com la fiabilitat ja que els convertidors de potència tenen una major fiabilitat que la dels elements passius, condensadors.

En aquest estudi, d'aquests potencials avantatges, només s'avaluarà les pèrdues de potència degudes al canvi entre alternatives de compensació sense tenir en compte un anàlisis d'harmònics o un anàlisis de fiabilitat del centre de dades amb i sense elements passius. Queden fora de l'estudi.

Un inconvenient qualitatiu d'incrementar la capacitat del convertidor de potència de la UPS, en comptes d'utilitzar bancs de condensadors, és que la inversió en la instal·lació en el sobredimensionat del convertidor és més gran que el cost d'un banc de condensadors.



6. Modelització de l'esquema elèctric

Recordant el que s'ha exposat anteriorment, aquest projecte es centrarà en l'estudi de la millora que s'aconsegueix al implementar un control al convertidor de manera que funcioni com a convertidor de la UPS i com a filtre actiu de potència reactiva. Per a poder fer les simulacions i el posterior anàlisi d'aquesta proposta, caldrà modelitzar cada un dels elements i el corresponent llaç de control.

Com s'ha vist a la Figura 4.1, Figura 4.4, Figura 4.5 i Figura 4.6 corresponents a la classificació per TIERs que pot presentar un centre de dades, l'esquema simplificat d'aquests edificis des de la xarxa fins els servidors engloba els següents elements: un transformador, els generadors dièsel de suport, els interruptors de protecció, les càrregues mecàniques del sistema de refrigeració, les UPSs, les PDUs i finalment els servidors.

A la pràctica, com la UPS en centres de dades és típicament estàtica de doble conversió, quan el corrent AC que ha d'alimentar les càrregues crítiques passa pel convertidor costat xarxa de la UPS es transforma a corrent DC, el que comporta que pel bus DC només pot ser travessat per potència activa i no per reactiva.

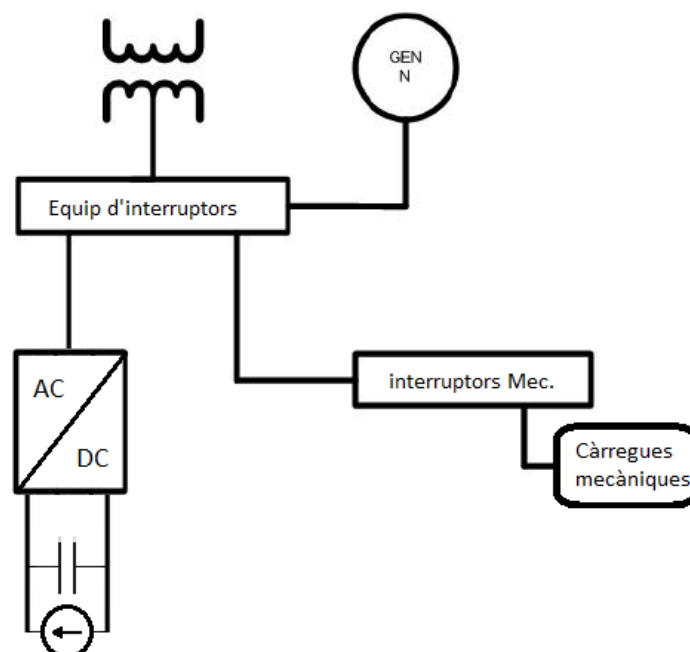


Figura 6.1 Esquema a modelitzar per a analitzar el concepte

En canvi la potència en la part de corrent AC, des del punt de connexió a la xarxa fins el convertidor, té una component d'activa i una de reactiva. Per tant, el sistema podem dir que està desacoblat pel bus de continua de la UPS i simplifiquem el número d'elements a modelitzar del centre de dades i es substituiran per una font de corrent que consumirà la potència activa d'aquests elements a partir del bus en DC de la UPS. Així doncs, el sistema a analitzar queda simplificat a la Figura 6.1 i es passarà a continuació a modelitzar cada element.

6.1. Convertidor costat xarxa de la UPS AC/DC

Amb la simplificació d'esquematitzar la UPS fins el bus de continua, el convertidor que es modelitzarà serà el del costat xarxa que funciona com a rectificador transformant tensions i corrents en AC a DC. A la Figura 6.2 es veu l'esquema elèctric a modelitzar.

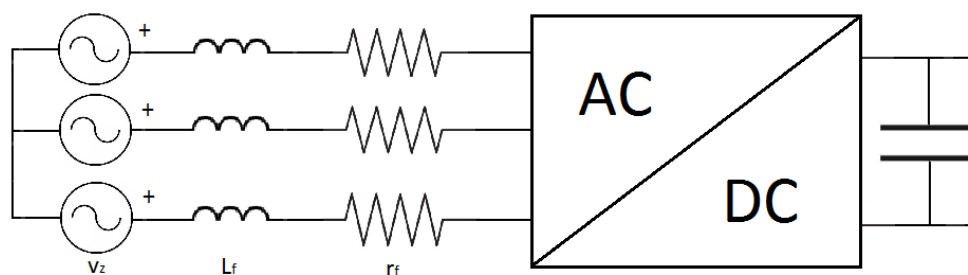


Figura 6.2 Esquema elèctric del convertidor AC/CC a modelitzar

El convertidor és un dispositiu que està format per sis interruptors controlables que es poden implementar físicament com a transistors d'unió bipolar (BJT's), transistors d'efecte de camp MOSFET, transistors de porta aïllada IGBT o tiristors, entre d'altres [17]. Un esquema elèctric d'aquest bloc es pot veure a la Figura 6.3. Aquest dispositiu pot estar controlat per diversos mètodes on el voltatge a la sortida del convertidor depèn de la seqüència en que els interruptors s'obren o es tanquen. Els convertidors típicament estan implementats amb IGBTs i un dels controls més comuns és la modulació d'amplada de pols de l'espai vector (SVPWM) [17] [18].



Aquest mètode treballa a unes freqüències de commutació en un interval de Kilohertz a Megahertz i la freqüència AC proporcionada per la xarxa és de 50 Hz. Això implica que les commutacions dels transistors són molt més ràpides que la freqüència de les tensions i corrents que travessen el centre de dades.

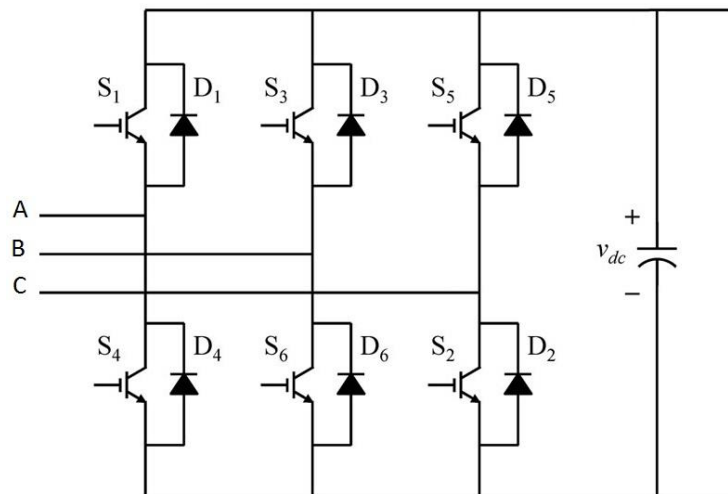


Figura 6.3 Esquema del AC/CC dissenyat amb IGBT

Com a aproximació, no es modelitzarà el convertidor amb cada interruptor commutant sinó que es considerarà un balanç de potències entre la potència activa consumida al costat AC, la que ha de passar al bus de continua i l'estimació de les pèrdues tant de commutació com de conducció del conjunt de transistors. Per estimar les pèrdues al convertidor, de commutació i conducció, s'han obtingut unes equacions per a cada TIER de centre de dades en funció del factor de càrrega mitjançant una aplicació web anomenat IPOSIM [21]. Es poden veure les equacions que s'empren a la Taula 6.1.

A la pràctica, el convertidor funciona imposant unes tensions en DC al bus de continua i unes tensions en AC a la xarxa. Per a que no hi hagi conflictes de les tensions imposades per la xarxa amb les que imposa el convertidor és necessari que el dispositiu s'acobli a l'esquema elèctric mitjançant una impedància, com un filtre inductiu.

Taula 6.1 Estimació de la potència perduda al convertidor

TIER	APROXIMACIÓ DE LES PÈRDUES AL CONVERTIDOR [W]
1	$P_{\text{per}} = 0,026 \cdot P_{\text{nom}} + 2,271 \cdot \left(\frac{P_{\text{IT}} \cdot 100}{P_{\text{nom}}}\right) + 0,0271 \cdot \left(\frac{P_{\text{IT}} \cdot 100}{P_{\text{nom}}}\right)^2$
2	$P_{\text{per}} = 0,018 \cdot P_{\text{nom}} + 11,383 \cdot \left(\frac{P_{\text{IT}} \cdot 100}{P_{\text{nom}}}\right) + 0,01371 \cdot \left(\frac{P_{\text{IT}} \cdot 100}{P_{\text{nom}}}\right)^2$
3	$P_{\text{per}} = 0,021 \cdot P_{\text{nom}} + 40,894 \cdot \left(\frac{P_{\text{IT}} \cdot 100}{P_{\text{nom}}}\right) + 0,3832 \cdot \left(\frac{P_{\text{IT}} \cdot 100}{P_{\text{nom}}}\right)^2$
4	$P_{\text{per}} = 0,010 \cdot P_{\text{nom}} + 204,47 \cdot \left(\frac{P_{\text{IT}} \cdot 100}{P_{\text{nom}}}\right) + 1,916 \cdot \left(\frac{P_{\text{IT}} \cdot 100}{P_{\text{nom}}}\right)^2$

On:

P_{per} és la potència perduda per commutació i conducció dels interruptors al convertidor.

P_{nom} és la potència nominal del convertidor.

P_{IT} és la potència al bus de continua per alimentar les càrregues IT.

La Figura 6.4 mostra la part del circuit amb les tensions imposades per la xarxa v_z i les tensions imposades pel convertidor v_c . Entre ambdues tensions hi ha un filtre inductiu d'inductància L_f i resistència r_f . L'equació vectorial que relaciona les tensions amb les corrents en base abc és 6.1.

$$\begin{bmatrix} V_{za} \\ V_{zb} \\ V_{zc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \end{bmatrix} = r_f \cdot \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} + L_f \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$



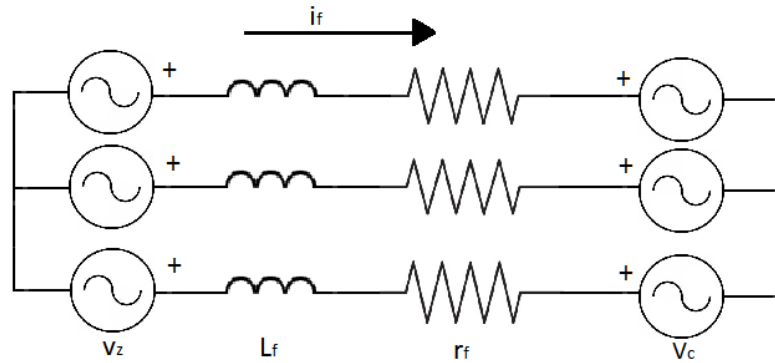


Figura 6.4 Circuit equivalent del filtre inductiu del convertidor

Per a facilitar l'algoritme de control que es modelitzarà, s'expressa l'equació en base qd0 mitjançant la transformada de Park descrita a l'annex A [19]

[20]. Utilitzant la matriu de canvi de base s'obtenen les següents dues equacions 6.2 on la component en 0 queda eliminada al considerar un sistema trifàsic equilibrat. Un inconvenient és que les components en els diferents eixos de la base qd0 queden relacionats fent que un eix depengui d'un altre.

$$\begin{cases} v_{zq} - v_{cq} = r_f i_{fq} + L_f \frac{d}{dt} i_{fq} + L_f w i_{fd} \\ v_{zd} - v_{cd} = r_f i_{fd} + L_f \frac{d}{dt} i_{fd} - L_f w i_{fq} \end{cases} \quad (6.2)$$

On el nou paràmetre que apareix en l'equació, w , és la pulsació angular del corrent.

Al bus DC de la UPS hi ha connectada una bateria de condensadors que determina la tensió al bus. A partir del balanç de potències al convertidor i bus es controlarà la tensió que es vol imposar energitzant la bateria de condensadors. Es calcularà mitjançant l'expressió 6.3.

$$E_{DC_c} = E_{DC_{c0}} + \frac{1}{C} \int_0^t i_{DC_c} dt \quad (6.3)$$

On C és la capacitat del condensador, i_{DC_c} és el corrent que travessa el condensador, $E_{DC_{c0}}$ és la tensió inicial del condensador i E_{DC_c} és la tensió del condensador.

La diferència de potència activa entre: la que consumeix el convertidor al costat AC, la que marxa pel bus de contínua i les perdudes al convertidor, és la potència consumida pel condensador. El balanç de potència activa pel convertidor i el bus de contínua es mostra a l'expressió 6.4.

$$P_c - P_{IT} - P_{per} = P_{DC_c} \quad (6.4)$$

On: P_{IT} és la demanda de potència que requereix el centre de dades des del bus DC de la UPS, P_{DC_c} és la potència que consumeix el condensador del bus, P_{per} és la potència perduda al convertidor i P_c és la potència que entra al convertidor pel costat AC. A la base dq0 (annex A) s'expressa com 6.5.

$$P_c = \frac{3}{2} (v_{cd} i_{cd} + v_{cq} i_{cq}) \quad (6.5)$$

L'energia emmagatzemada per un condensador [22] és 6.6. i, per tant, la potència emmagatzemada al condensador és 6.7.

$$\text{Energia}_{DC_c} = \frac{1}{2} C E_{DC_c}^2 \quad (6.6)$$

$$P_{DC_c} = \frac{d}{dt} \text{Energia}_{DC_c} = \frac{1}{2} C \frac{d}{dt} E_{DC_c}^2 \quad (6.7)$$

6.2. Modelització del cablejat

Per modelitzar el cablejat existent en un centre de dades s'haurà d'estimar la impedància elèctrica de les línies de distribució dins del centre de dades per a tenir en compte les petites pèrdues que puguin ocasionar. La impedància d'una línia pot modelitzar-se de diverses maneres: un mètode és dissenyar una sèrie d'impedàncies distribuïdes per trams on, quants més trams hi hagi, més s'ajustarà a la realitat. La segona manera és concentrar tota la impedància del cablejat en un únic bloc. La línia de distribució que presenta un centre de dades entre el punt de connexió de la xarxa fins la UPS no sol ser molt llarga. Per això, es simplificarà el model optant per l'alternativa de concentrar la impedància en un sol tram [23].

Un model per una línia de paràmetres concentrats és un model en π que presenta una resistència elèctrica R en sèrie amb una inductància L en paral·lel amb un condensador de capacitat C [24]. Per a línies curtes, que no arriba al quilòmetre, és bona aproximació simplificar el circuit negligint el condensador [23], el que es coneix com una línia inductiva.



S'utilitzarà una branca en sèrie RL com a model per a la línia de transmissió de la llibreria de Simulink SimPowerSystems. Aquesta disposició es mostra a la Figura 6.5 [24].

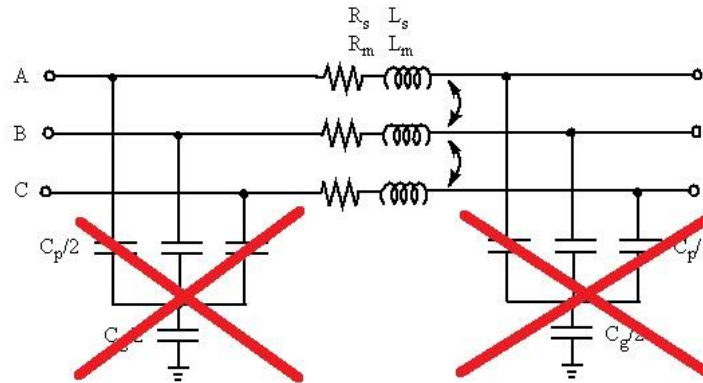


Figura 6.5 Model en π d'una línia trifàsica sense component capacitiva

La resistència elèctrica que ofereix un conductor al pas del corrent es pot aproximar amb l'equació 6.8 [25], negligint la variació d'aquesta resistència amb la temperatura del cable.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (6.8)$$

On R és la resistència elèctrica [Ω], ρ és la resistivitat del conductor [$\Omega \cdot m$], l és la longitud del conductor [m] i S és la secció del conductor [m^2].

A més de resistència elèctrica, els cables tenen una inductància que es crea per la interacció de la corrent alterna de la pròpia línia i el camp magnètic que l'envolta. Hi ha diverses equacions que permeten fer una estimació d'aquest component com l'equació 6.9 [23]. D'aquesta equació hi ha paràmetres que per a cada centre de dades poden ser diferents i no es té cap estimació d'algun de real; s'utilitzarà per a modelitzar la inductància que presenta cada fase un valor que es a la pràctica es un valor típic a les línies de distribució [23] [26].

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot L_n \frac{d}{r} + \frac{\mu_0}{8\pi} \quad (6.9)$$

On L és la inductància per metre de cada fase [$\frac{H}{m}$], μ_0 és la permeabilitat magnètica del buit, d és la mitjana geomètrica de les distàncies entre els centres de cada cable i r és el radi

d'aquests.

Com des del punt de connexió a la xarxa fins el convertidor de la UPS hi ha varis trams de cablejat, de la xarxa a les proteccions i de les proteccions a la UPS per exemple, per a simplificar la modelització és considerarà una única impedància que englobi tota la longitud del cablejat col·locada entre el transformador i la UP. En ocasions el transformador de l'edifici es col·loca a l'exterior amb algunes de les càrregues mecàniques més importants, els chillers, i d'aquí es passa a connectar amb la UPS a l'interior del centre de dades. Aquesta és la principal raó de col·locar la impedància del cable entre el transformador i la UPS ja que és considera com el tram més llarg.

6.3. Modelització de la xarxa

La xarxa elèctrica en la que s'instal·la el centre de dades és la encarregada de subministrar qualitat en el subministrament d'aquest edifici. Si la xarxa és dèbil pot presentar quantitat de problemes en la qualitat de les tensions i corrents que alimenten el centre de dades. S'entén com a qualitat pobre de la xarxa quan aquesta no és capaç de subministrar un flux de potència estable, treballar com una font sempre disponible i amb ones sinusoïdals lliures de sorolls i amb tensions i freqüències sempre dintre de les toleràncies [27]. Alguns dels problemes que presenten xarxes de qualitat pobre són:

- Presència d'harmònics en el subministrament de l'edifici
- Tensions no balancejades
- Variacions del voltatge nominal a la xarxa
- Presència de "Flicker" que són ràpides variacions en la tensió

Si es considera que un centre de dades és una instal·lació que necessita una bona qualitat en el subministrament, aquesta instal·lació s'emplaçarà on la xarxa elèctrica sigui prou forta i robusta per a que, des del punt de vista d'un centre de dades, el punt de connexió de la instal·lació sempre es vegi com una font de tensió ideal equilibrada. El cas de fallada de la xarxa no es considera en aquest estudi.

6.4. Modelització de les proteccions

Els interruptors de potència de baixa tensió de les proteccions s'utilitzen habitualment en els centres de dades moderns per les operacions principals de commutació i transmissió d'energia. Aquests dispositius tenen un impacte en la fiabilitat del centre de dades de tres



maneres [28]:

- El seu disseny ha de proporcionar un funcionament continu fiable. A més, el dispositiu ha d'interrompre el pas de corrent amb gran rapidesa i eficiència davant de condicions anormals.
- El circuit d'interruptors ha de ser aplicada de tal manera que redueixi l'error humà.
- El disseny i aplicacions de les proteccions ha de optimitzar el procés de manteniment.

Es pot veure un disseny conceptual d'un circuit d'interruptors que componen les proteccions a la Figura 6.6 [28]. Aquest dispositiu és dels més complexos ja que ha d'optimitzar-se per les seves dos funcions contradictòries entre sí. La primera és reduir les pèrdues de conducció quan el dispositiu és travessat per corrent en condicions normals de treball. La segona és interrompre de forma eficient el corrent quan sigui necessari.

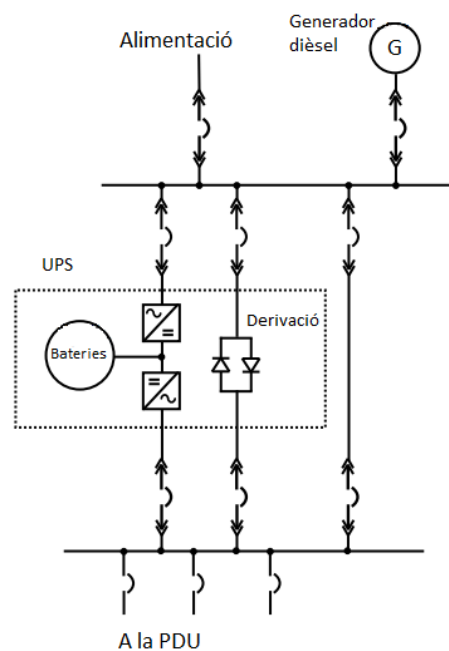


Figura 6.6 Esquema elèctric dels interruptors de protecció

En aquest projecte es proposa treballar sota condicions normals de funcionament. Així, es deixa fóra d'aquest projecte l'estudi dels transitoris que es tenen per la commutació d'algun dels interruptors.

Fent aquesta consideració, el dispositiu queda simplificat a una petita resistència elèctrica

que servirà per estimar les pèrdues del pas del corrent pel dispositiu. Aquesta resistència es pot estimar coneixent l'equació 6.10 per a aproximar les pèrdues del circuit de protecció [29].

$$P_{cp} = P_{ncp} \cdot \left(\frac{I_b}{I_{ncp}}\right)^2 \quad (6.10)$$

6.5. Modelització del transformador

A tots els esquemes dels TIERs exposats hi ha l'element que s'encarrega de baixar la tensió del punt de connexió de la xarxa a baixa tensió, que és a la que treballen els equips IT. Alhora, aquest element també proporciona un aïllament galvànic de la tensió i corrent que proporciona la xarxa. Aquest element és el transformador [30].

Agafant com a referència un projecte de l'empresa abb [31], a la Figura 6.7 s'observa com el transformador que s'utilitza en aquests edificis treballa reduint la tensió de mitja tensió (MT) a baixa tensió (BT).

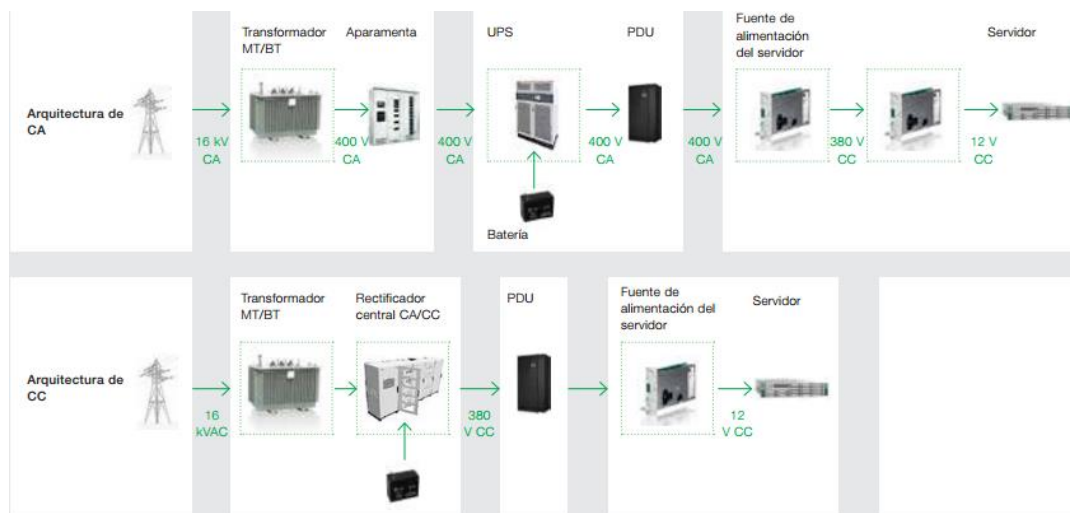


Figura 6.7 Esquema comparatiu d'una distribució en AC i DC

Els transformadors podrien ser monofàsics separats per a cada fase, però són més utilitats els transformadors trifàsics on les fases estan enrotllades a un únic bastidor.

Els enrotllaments poden estar connectats de diferent manera: en estrella, en triangle o en zig zag. Alhora, no és necessari que els dos enrotllaments estiguin connectats de la mateixa manera, sinó que el transformador pot estar connectat en estrella-triangle ($Y\Delta$), estrella-



zigzag (Yz), triangle-triangle ($\Delta\Delta$), entre d'altres [32].

Abans de modelitzar el transformador, s'ha de trobar quin tipus és el que s'utilitza en els centres de dades. El transformador serà de MT a BT i el parell de connexions normalitzats per aquest tipus de transformadors és una connexió dels enrotllaments en triangle-estrella 11 ($\Delta y11$) [33]. L'enrotllament en triangle es connectarà a la xarxa i l'estrella al costat del centre de dades. Aquesta topologia de transformador no presenta gaires inconvenients i no presenta problemes causats per tercers harmònics. El número 11 de la topologia del transformador dona idea del desfasament de les tensions entre el primari i el secundari [34], quan el transformador està en buit. Els desfasaments s'indiquen en múltiples de 30° i corresponen a l'angle que formen els vectors corresponents entre les fases del primari i el secundari. Es pot fer l'analogia a les manetes d'un rellotge on els vectors de les fases del primari i secundari marquen una hora que coincideix amb el desfasament (11h en el cas de la topologia abans esmentada). Aquesta topologia de transformador es mostra a la Figura 6.8 [32].

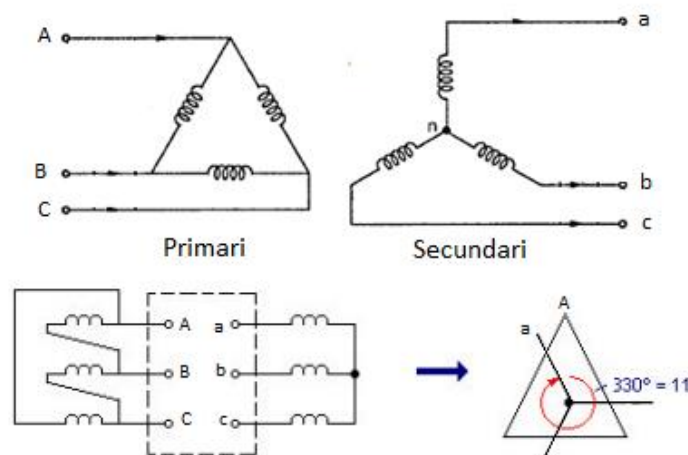


Figura 6.8 Connexió en triangle-estrella 11 del transformador

Quan un sistema trifàsic treballa de manera equilibrada, per a estudiar-lo pot ser representat com un sistema equivalent monofàsic aconseguint reduir l'esforç computacional. En el cas que s'estigués treballant amb càrregues desequilibrades caldria un model trifàsic del transformador tal i com és. [4] L'esquema equivalent d'un transformador monofàsic es presenta a la Figura B.2 de l'annex i es regeix per les equacions 6.11 i 6.12.

$$v_1 = i_1 r_1 + L_{l1} \frac{di_1}{dt} + L_{m1} \frac{d}{dt} (i_1 + i'_2) \quad (6.11)$$

$$v'_2 = \frac{N_1}{N_2} v_2 = i'_2 r'_2 + L'_{l2} \frac{di'_2}{dt} + L_{m1} \frac{d}{dt} (i_1 + i'_2) \quad (6.12)$$

L'apòstrof dels paràmetres corresponents al segon debanat indica que estan expressats en base al primer. El desenvolupament per a trobar aquestes equacions es troba al annex B.

Tornarem a fer ús de la llibreria SimPowerSystems de Simulink on ja trobem un bloc que implementa aquestes equacions per a cada fase. L'analogia entre l'esquema monofàsic anterior amb el que correspon a un transformador connectat en triangle-estrella s'il·lustra a la Figura 6.9 [4] on, a la pràctica, la relació de transformació entre les tensions i corrents del primari i del secundari es mostra a l'equació 6.13.

$$r_t = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2} \quad (6.13)$$

On U_1 i U_2 són les tensions fase neutre del primari i del secundari, N_1 i N_2 són el número de espiras que tenen els enrotllaments primari i secundari.

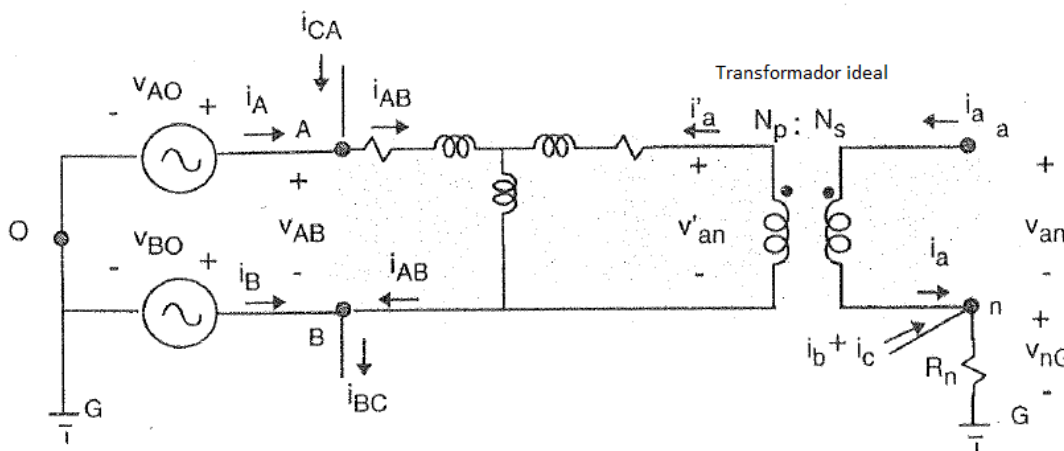


Figura 6.9 Esquema equivalent d'una fase d'un transformador triangle-estrella



6.6. Modelització de les càrregues mecàniques

La refrigeració d'un centre de dades és un pilar important del consum de l'edifici que pot ser molt similar al consum propi de les càrregues IT. Hi ha diversos mètodes que es poden emprar per a refrigerar correctament el centre de dades, es mostra un esquema resum a la Figura 6.10 [35]. Totes les diferents alternatives que es poden implementar com a sistema de refrigeració presenten els seus avantatges i inconvenients. La decisió sobre quin sistema escollir engloba molts factors. Entre d'altres, les característiques de cada alternativa, el tipus de centre de dades, el lloc geogràfic de l'emplaçament o la densitat de potència. Uns dispositius usuals en els sistemes de refrigeració són els CRAC ("Computer Room Air Conditioner") o els CRAH ("Computer Room Air Handler") per l'interior del centre de dades i els "Chillers" per l'exterior.

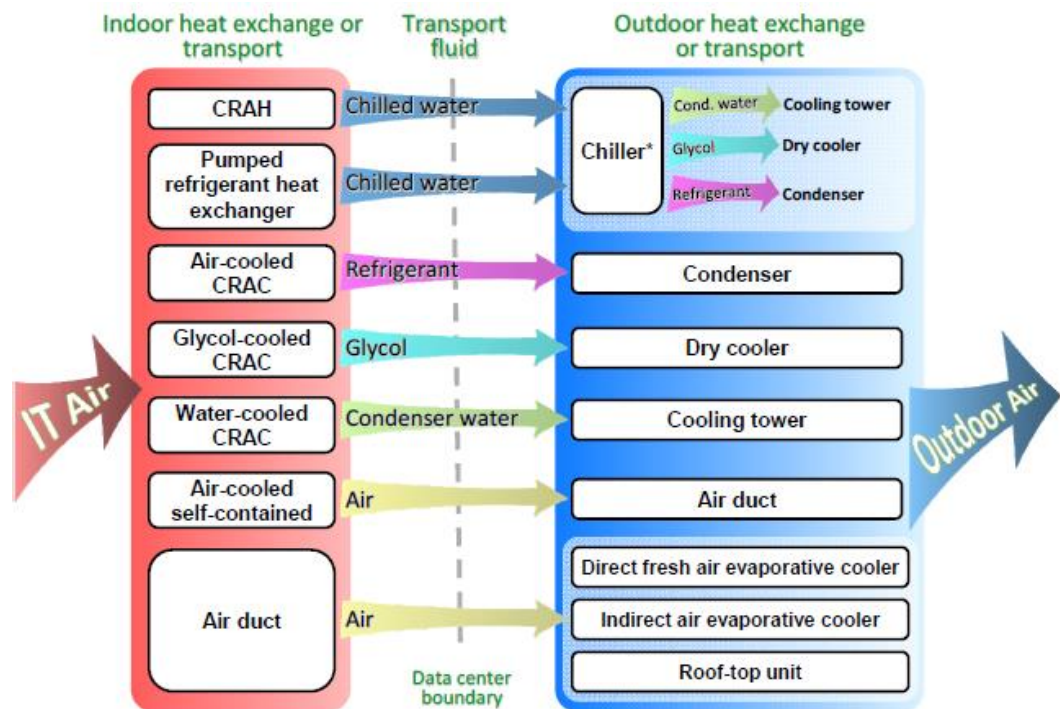


Figura 6.10 Connexió en triangle-estrella 11 del transformador

Aquests dispositius, amb les seves bombes i ventiladors per a moure el fluid refrigerant, són les càrregues mecàniques connectades al sistema elèctric del centre de dades. Aquests dispositius estan formats per motors, per exemple els "Chillers" [36]. Aquests motors poden ser d'inducció o síncrons, però és usual que aquests siguin d'inducció de gàbia d'esquirol

("squirrel-cage motor"). Per tant, modelitzarem les càrregues mecàniques del sistema elèctric englobant el sistema de refrigeració a un motor d'inducció típic que s'encarregarà de proporcionar la potència de refrigeració necessària pel centre de dades.

En el model s'emprarà un motor d'inducció i s'utilitzarà també la llibreria de Matlab/Simulink SimPowerSystems on l'esquema equivalent es basa en la transformada de Park per facilitar la computació [4]. L'esquema equivalent es mostra a l'annex C i la transformada de Park a l'annex A.

Per a regular el cabal del sistema de refrigeració hi ha diversos dispositius que es poden utilitzar: vàlvules mecàniques d'estrangulament o dispositius variadors de freqüència (VFDs). Un VFD és un tipus de controlador que s'encarrega de variar freqüència i voltatge subministrat al motor. Quan el sistema de refrigeració treballa a baixa capacitat, l'ús de VFDs per als compressors en grans "chillers" proporciona la capacitat de modular l'energia de manera eficient. A més, els refrigeradors connectats amb un VFD poden exhibir una major fiabilitat i temps de vida com a resultat de controlar el factor de càrrega i una engegada suau del motor.

Un VFD consisteix en dos convertidors, AC/DC i DC/AC, disposats en back-to-back per un bus de continua on el rectificador està compost per díodes i l'inversor per transistors controlables. La ona generada a la sortida d'aquest dispositiu no té una forma sinusoïdal

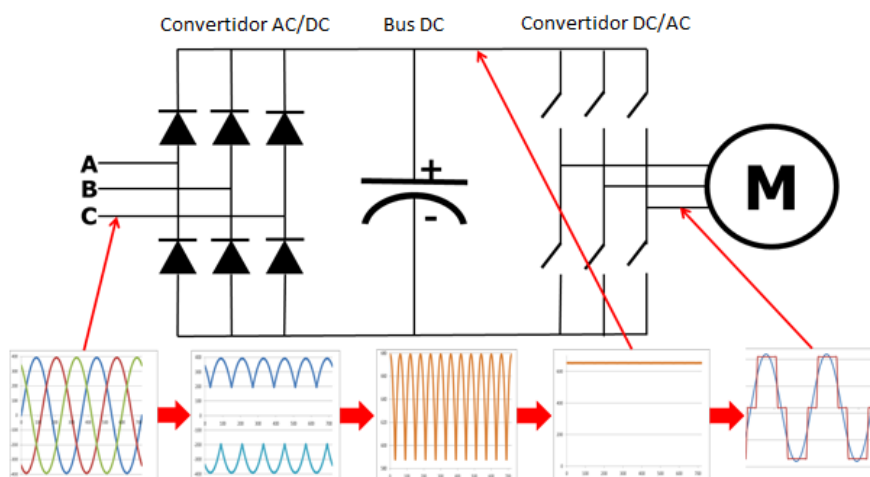


Figura 6.11 Esquema d'un VFD amb les formes d'ona de la tensió al dispositiu



sinó que és una ona rectangular. Les ones rectangulars no són una bona opció per a la distribució, però és adequada per a un motor. Es veu l'esquemàtic del dispositiu a la Figura 6.11 [37]. Utilitza el control per modulació d'amplada de pols (PWM) establint una relació de voltatge entre freqüència. Així, si volem reduir la freqüència a la meitat, el voltatge serà també la meitat.

Encara que els dispositius VFD presenten els avantatges esmentats, a l'actualitat s'estan introduint als centres de dades i les solucions per al sistema de refrigeració és un control mecànic amb vàlvules com es pot veure al catàleg de Emerson Network Power, empresa dedicada als centres de dades [38]. Per a la modelització del centre de dades s'optarà per representar el sistema de refrigeració: motors d'inducció connectats directament a la xarxa com si aquest edifici es regulés amb vàlvules i no amb un dispositiu VFD.

6.7. Modelització dels elements de compensació de reactiva

Els centres de dades necessiten d'algun element per millorar el factor de potència al punt de connexió amb la xarxa a causa del consum de potència reactiva de les càrregues mecàniques i el transformador de l'esquema elèctric. És usual col·locar un dispositiu d'elements passius com un banc de condensadors o un d'actiu com una STATCOM que compensi el consum de potència reactiva de les càrregues mecàniques per millorar el factor de potència. Es mostra un exemple d'una STATCOM a la Figura 6.12 [39].

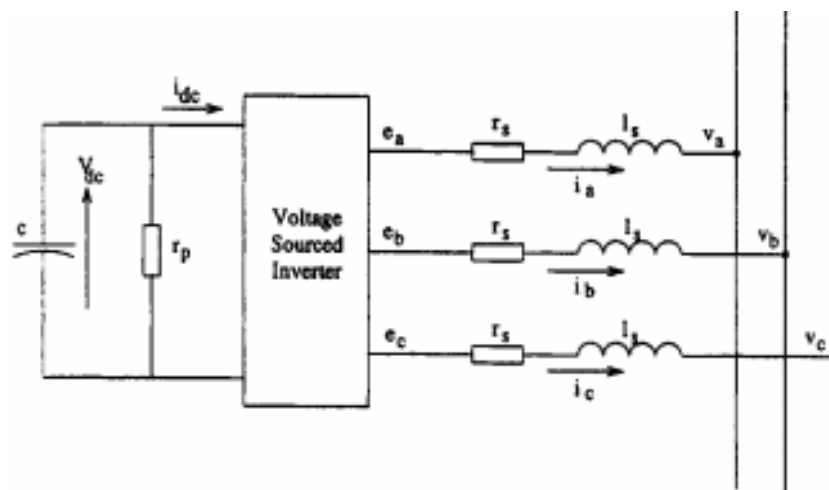


Figura 6.12 Esquema equivalent d'una STATCOM

Mentre que el banc de condensadors és un dispositiu passiu que s'acobla a l'esquema elèctric, la STATCOM és un dispositiu de compensació actiu de la família dels FACT (sistema de transmissió flexible en AC). Una STATCOM connectat en paral·lel amb un circuit és capaç de generar un sistema trifàsic de voltatges equilibrat a la freqüència fonamental de la xarxa amb un ràpid control de l'amplitud i la fase per tal de compensar activament la potència reactiva. L'ús d'inversors redueix la distorsió d'harmònics a les tensions generades. Aquest dispositiu pot ser implementat amb diferents tecnologies, però la més practica per a aplicacions d'alta potència, superiors a 10 MVA, és usar tiristors GTO com a inversors de tensió controlable [39]. A la pràctica, un controlador convencional PI (proporcional-integral) s'usa típicament per al control d'aquests dispositius amb un temps de resposta molt petit.

Al model utilitzarem un banc de condensadors comercial que compensarà la potència reactiva consumida majoritàriament pels motors al punt de connexió amb el costat de baixa tensió del transformador. A la pràctica, s'utilitzen bateries de condensadors modulars que es poden connectar o desconnectar segons la quantitat de reactiva que es vulgui compensar, però no és un mecanisme que aconsegueixi reduir la potència reactiva a zero, sinó que només es connecten els condensadors que permeten fer una correcta compensació. Els bancs de condensadors utilitzats s'escolliran del catàleg de Schneider Electric [40], uns condensadors de baixa tensió amb baixes pèrdues de potència activa. Al model es representaran com una càrrega capacitiva amb unes petites pèrdues connectada a l'esquema elèctric del centre de dades al punt on es vol compensar.



7. Model del control

El controlador es el responsable de mantenir una tensió del bus DC a un valor constant de referencia. A més també s'encarrega de regular la potència reactiva injectada o absorbida de la xarxa externa. S'ha trobat l'algoritme de control en base a la teoria de potència instantània [41] i la transformada de Park, annex A.

En tot cas el convertidor haurà de tenir un control sobre els transistors que establirà la tensió en borns del costat xarxa i de la tensió en el bus de continua. Aquest control és el que s'ha anomenat anteriorment SVPWM, i funciona controlant l'obertura o el tancament dels transistors de manera que la ona generada s'apropi a una sinusoide. Per a simplificar el control, es considerarà només un controlador a baix nivell que obté les tensions que ha de presentar el convertidor en borns. Això comporta que es considera que el dispositiu SVPWM funciona molt més ràpid que aquest controlador fent que les tensions obtingudes per el controlador dissenyat passin a ser directament les que es presenten en borns del convertidor quasi instantàniament.

Tot i que el convertidor necessita d'un controlador, aquest serà diferent per a les opcions on es vol implementar el control de reactiva de les altres dues. És per aquest motiu que s'explicaran separatament els dos sistemes de control que, tot i que similars, són diferents. Aquest llaç controlarà la tensió del bus de continua i la tensió en borns del costat de la xarxa i, per tal d'aconseguir-ho, es separarà un primer control de corrent i un segon control sobre la tensió.

7.1. Control del convertidor sense reactiva

Aquest control correspon a les dues primeres fases de l'estudi, l'esquema sense cap compensació de reactiva i l'esquema amb banc de condensadors. Per a poder dissenyar el controlador, cal primer entendre la planta s'ha de controlar. En aquest cas la planta serà el filtre inductiu que separa el convertidor de l'esquema elèctric general per no causar conflictes de tensió de les imposades en borns del convertidor i les imposades per la xarxa. Aquest sistema ja s'ha treballat primerament en l'apartat de modelització en una base arbitrària dq0 on les equacions que regeixen aquest filtre són 6.2 i l'esquema de la planta a controlar es mostra a la Figura 6.4.

Com es pot veure a les equacions 6.2. els dos eixos q i d estan acoblats l'un respecte de l'altre de manera que no podem modificar un eix sense modificar l'altre. Per a un correcte control caldrà desacoblar-les i eliminar la dependència de la dinàmica amb la freqüència de la xarxa així que s'estableix el sistema 7.1.

$$\begin{cases} \tilde{v}_{cq} = r_f i_{fq} + L_f \frac{d}{dt} i_{fq} \\ \tilde{v}_{cd} = r_f i_{fd} + L_f \frac{d}{dt} i_{fd} \end{cases} \quad (7.1.)$$

Aquestes noves equacions, a més de aconseguir el desacoblament, són equacions diferencials lineals ordinàries de primer ordre. Substituint les equacions 7.1. a les antigues equacions 6.2. s'obté les tensions del convertidor en funció de les noves tensions desacoblades 7.2.

$$\begin{cases} v_{zq} - v_{cq} = \tilde{v}_{cq} + L_f w i_{fd} \\ v_{zd} - v_{cd} = \tilde{v}_{cd} - L_f w i_{fq} \end{cases} \quad (7.2.)$$

La metodologia per dissenyar el controlador es trobarà a l'annex D on s'extreu un controlador proporcional-integral (PI). Els paràmetres característics d'aquest controlador són els següents (7.3.):

$$\begin{cases} C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \\ K_p = \frac{L_f}{\lambda} \\ K_i = \frac{r_f}{\lambda} \end{cases} \quad (7.3.)$$

Així a la Figura 7.1 es mostra el control sobre el corrent que permet governar el convertidor. $C(s)$ és el controlador PI, L_f i r_f són la inductància i la resistència del filtre del convertidor, w és la pulsació de la xarxa i λ és la constant de temps de la funció de transferència enllaç tancat (annex D).

En aquest control és necessiten unes corrents de referència i_{fq}^* i i_{fd}^* que es compararan amb els corrents en aquell moment al convertidor. Per obtenir aquestes referències s'haurà de realitzar el segon control sobre la tensió al bus de continua i una referència sobre la potència reactiva intercanviada. Per a aconseguir els corrents s'ha d'establir una referència de tensions on la component v_{cq} és nul·la.



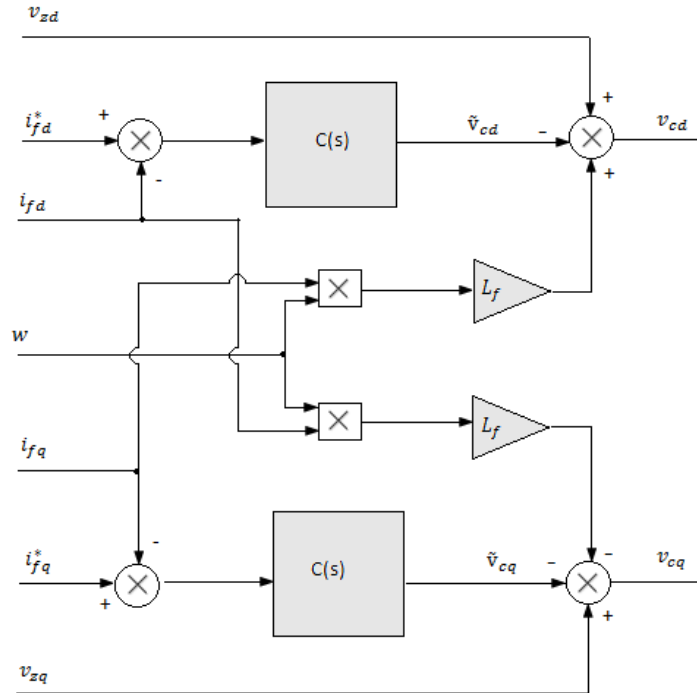


Figura 7.1 Diagrama de blocs del control sobre el corrent

El control sobre el convertidor costat xarxa és el responsable de mantenir la tensió del bus DC a un valor constant de referència. A més, aquest controlador s'encarrega de regular la potència reactiva de la xarxa externa. S'utilitza l'algorisme basat en la teoria de potència instantània, annex A. Primerament, la potència reactiva entregada pel convertidor Q_c imposant la component v_{cq} nul·la és:

$$Q_c = \frac{3}{2} (v_{cd} i_{cq} - v_{cq} i_{cd}) = \frac{3}{2} v_{cd} i_{cq} \quad (7.4.)$$

D'aquesta equació es pot substituir la potència entregada Q_c pel convertidor per la potència reactiva desitjada Q_c^* i s'aïlla el corrent en l'eix q, i_{cq} , obtenint el corrent de referència el l'eix q, i_{cq}^* . Com el convertidor no ha d'entregar cap potència reactiva: Q_c^* serà nul·la i, per tant, i_{cq}^* també.

$$i_{cq}^* = \frac{2Q_c^*}{3v_{cd}} \quad (7.5.)$$

Pel control de la tensió del bus DC, la sortida del controlador és la intensitat de referència en l'eix d, i_{cd}^* . Per tal de dissenyar-lo cal establir una sèrie d'hipòtesis:

- El condensador del bus de continua es considera prou gran com per que la dinàmica del voltatge al bus sigui més lenta que la dinàmica del llaç de control d'intensitat.
- El llaç de control del corrent és suficientment ràpid com per a que es pugui considerar el convertidor com una font de corrent.
- El convertidor en realitat presenta unes pèrdues, però si aquestes són petites no es consideren alhora de dissenyar el control.

Tenint aquests punts en compte i que a component en q de la tensió del convertidor, el balanç de potències al convertidor queda:

$$P_{DC} = P_c + P_{per} \cong P_c \quad (7.6.)$$

$$P_c = \frac{3}{2}(v_{cd}i_{cd} + v_{cq}i_{cq}) = \frac{3}{2}v_{cd}i_{cd} \quad (7.7.)$$

$$P_{DC} = E \cdot i_{DC} \quad (7.8.)$$

$$i_{DC} = \frac{3 \cdot v_{cd}}{2 \cdot E} i_{cd} \quad (7.9.)$$

On els paràmetres de les equacions són les que es mostren a la Figura 7.1. On: P_{DC} és la potència que surt del convertidor AC/DC pel bus de continua, P_c és la potència que entra pel costat AC. Fent la hipòtesis que tant la tensió v_{cd} com E no varien gaire i la seva divisió es pot considerar constant es troba que existeix una dependència lineal entre el corrent al bus de continua i el corrent a la banda AC.

$$k = \frac{v_{cd}}{E} \quad (7.10.)$$

$$i_{DC} = \frac{3k}{2} i_{cd} \quad (7.11.)$$



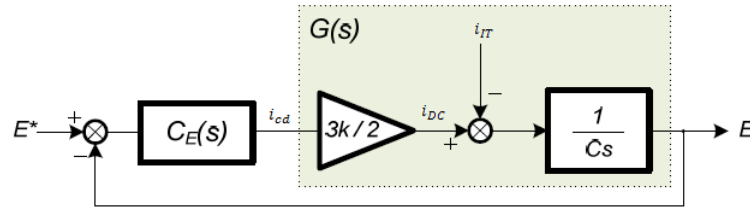


Figura 7.2 Diagrama de blocs del control sobre la tensió del bus DC

A la vegada, i_{DC} és igual al corrent que entra al convertidor DC/AC de la UPS, i_{IT} , i el corrent del condensador, i_C . Usant l'equació 10.3 on es relaciona el corrent del condensador amb la tensió del bus de continua es troba el següent esquema del control, Figura 7.2 [42]. Com que i_{IT} és diferent de zero, per a assegurar un error estacionari nul cal un controlador PI.

La funció de transferència amb aquest controlador queda:

$$\frac{E}{E^*} = \frac{\frac{3kK_{pE}}{2C}s + \frac{3kK_{iE}}{2C}}{s^2 + \frac{3kK_{pE}}{2C}s + \frac{3kK_{iE}}{2C}} \quad (7.12.)$$

Que és equivalent a 11.13. i, finalment els paràmetres del controlador PI són:

$$\frac{E}{E^*} = \frac{2\xi_E w_E s + w_E^2}{s^2 + 2\xi_E w_E s + w_E^2} \quad (7.13.)$$

$$K_{pE} = \frac{4C\xi_E w_E}{3k} \quad (7.14.)$$

$$K_{iE} = \frac{2Cw_E^2}{3k} \quad (7.15.)$$

7.2. Control del convertidor amb compensació de reactiva

El segon control que s'ha de dissenyar és el que correspon a l'opció en que el convertidor generarà potència reactiva. La planta en aquest cas engloba tot l'esquema elèctric: des del punt de connexió a la xarxa fins els borns del convertidor AC/DC. Es tractarà la planta amb l'esquema per fase per a poder simplificar-la. Seguidament es passarà a una base arbitrària dq0 com en el cas anterior per poder eliminar l'eix 0 al considerar el sistema trifàsic

equilibrat. L'esquema per fase de la planta es mostra a la Figura 7.3.

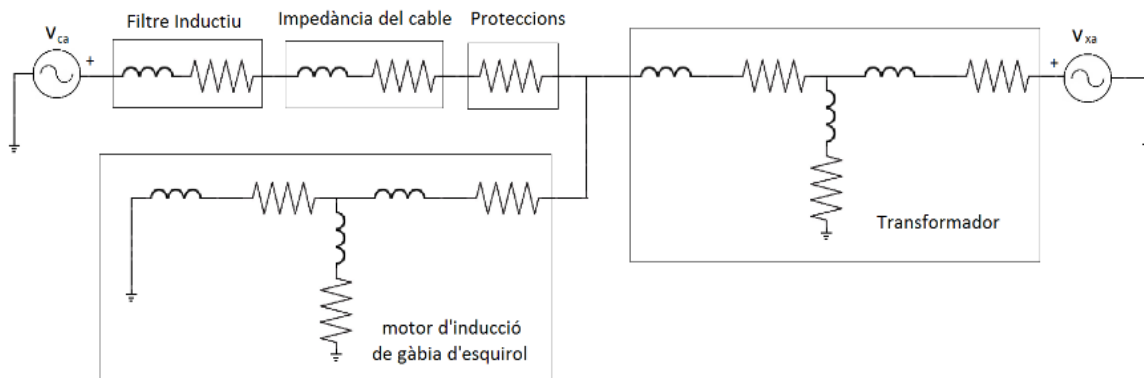


Figura 7.3 Esquema per fase des de la xarxa al convertidor AC/DC

El motor d'inducció de l'esquema simula les diferents bombes i ventiladors del sistema de refrigeració del centre de dades com un únic element que les engloba. És conegut un perfil de potència mecànica requerida d'aquest conjunt i s'utilitzarà una consigna del parell mecànic necessari que ha de realitzar la màquina per a aconseguir aquest perfil de potència mecànica requerida. El consum del motor d'inducció, a la pràctica, es veu poc afectat per les petites variacions en el voltatge en borns de la màquina i es pot simplificar per a dissenyar el control com una font de corrent per a les tres fases, sempre fent el sistema equilibrat.

Es pot veure que les branques del transformador tenen una impedància molt més petita als debanats comparada amb la branca magnetitzant. Es pot pensar que la contribució d'aquesta branca, en termes de variacions per el control, no és significatiu i es pot simplificar també de l'esquema. Amb aquestes dues simplificacions, l'esquema que ens

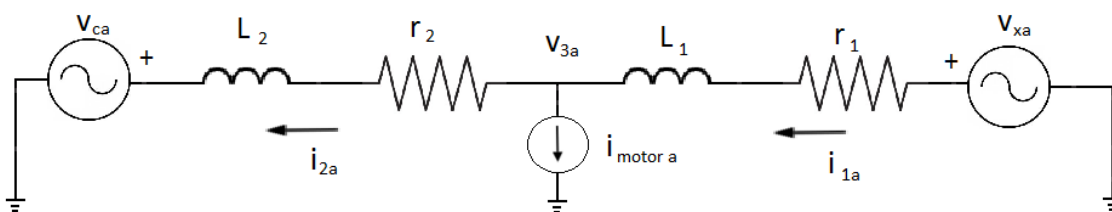


Figura 7.4 Esquema simplificat per fase des de la xarxa al convertidor AC/DC



determina la planta queda reduïda a dos branques separades per una intensitat que marxa del sistema, fent més fàcil la manipulació de les equacions, Figura 7.4.

Les equacions de cada una de les dues branques en una base abc són 6.1 i en una base dq0 6.2, com es va veure en l'apartat 6.1 Convertidor costat xarxa de la UPS AC/DC, corresponent al filtre inductiu. Agrupant les impedàncies i anomenant a cada variable com s'aprecia a la Figura 7.4 el conjunt d'equacions que determinen el sistema en base qd0 són:

$$\begin{cases} v_{xq} = r_1 i_{1q} + L_1 \frac{di_{1q}}{dt} + L_1 w i_{1d} + v_{3q} \\ v_{xd} = r_1 i_{1d} + L_1 \frac{di_{1d}}{dt} - L_1 w i_{1q} + v_{3d} \\ v_{3q} = r_2 i_{2q} + L_2 \frac{di_{2q}}{dt} + L_2 w i_{2d} + v_{cq} \\ v_{3d} = r_2 i_{2d} + L_2 \frac{di_{2d}}{dt} - L_2 w i_{2q} + v_{cd} \\ i_{1q} = i_{2q} + i_{motorq} \\ i_{1d} = i_{2d} + i_{motord} \end{cases} \quad (7.16.)$$

Per a trobar la funció de transferència del sistema es treballarà en l'espai d'estats on es definiran dos estats nous, 7.17. Aquests dos estats nous s'escullen de manera que s'obté el següent nou sistema d'equacions diferencials de primer ordre, 7.18.

$$\begin{cases} X_1 = L_1 i_{1q} + L_2 i_{2q} \\ X_2 = L_1 i_{1d} + L_2 i_{2d} \end{cases} \quad (7.17.)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + B \begin{pmatrix} v_{cq} \\ v_{cd} \\ v_{xq} \\ v_{xd} \\ i_{motorq} \\ i_{motord} \end{pmatrix} \quad (7.18.)$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{R_2 L_1}{L_2 (L_2 + L_1)} - \frac{R_1}{(L_2 + L_1)} - \frac{R_2}{L_2} & -w \\ w & \frac{R_2 L_1}{L_2 (L_2 + L_1)} - \frac{R_1}{(L_2 + L_1)} - \frac{R_2}{L_2} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & \frac{R_2 L_1}{(L_2 + L_1)} - \frac{R_1 L_2}{(L_2 + L_1)} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & \frac{R_2 L_1}{(L_2 + L_1)} - \frac{R_1 L_2}{(L_2 + L_1)} \end{pmatrix}$$

El sistema que primerament estava desacoblat per fases, al aplicar el canvi de base a dq0 aquest queda acoblat entre els dos eixos i cal desacoblar-lo per a facilitar el disseny del controlador com en el cas del controlador anterior. Aquest desacoblament es realitzarà mitjançant el canvi de variables presentat a les equacions 7.19., que substituïdes al sistema 7.18. desacobla la matriu A essent aquesta diagonal, A', i modificant la matriu B, B'. L'estratègia a seguir per aquest llaç de control seguirà sent la presentada a l'annex D amb la diferència de que s'ha de tenir en compte la intensitat que es deriva al motor com una pertorbació. Amb aquestes noves variables les equacions per a utilitzar la metodologia de l'annex D seran 7.20. i 7.21.

$$\begin{pmatrix} v_{cq} \\ v_{cd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -wX_2 \\ wX_1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{v}_q \\ \hat{v}_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{xq} \\ v_{xd} \end{pmatrix} \quad (7.19.)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{pmatrix} = A' \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + B' \begin{pmatrix} \hat{v}_q \\ \hat{v}_d \\ i_{motorq} \\ i_{motord} \end{pmatrix} \quad (7.20.)$$

$$\begin{pmatrix} i_{1q} \\ i_{1d} \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + D \begin{pmatrix} \hat{v}_q \\ \hat{v}_d \\ i_{motorq} \\ i_{motord} \end{pmatrix} \quad (7.21.)$$

$$A' = \begin{pmatrix} \frac{R_2 L_1}{L_2(L_2 + L_1)} - \frac{R_1}{(L_2 + L_1)} - \frac{R_2}{L_2} & 0 \\ 0 & \frac{R_2 L_1}{L_2(L_2 + L_1)} - \frac{R_1}{(L_2 + L_1)} - \frac{R_2}{L_2} \end{pmatrix}$$

$$B' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{R_2 L_1}{(L_2 + L_1)} - \frac{R_1 L_2}{(L_2 + L_1)} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{R_2 L_1}{(L_2 + L_1)} - \frac{R_1 L_2}{(L_2 + L_1)} \end{pmatrix}$$



$$C = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_2 + L_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2 + L_1} \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{L_2}{L_2 + L_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{L_2}{L_2 + L_1} \end{pmatrix}$$

Amb aquestes equacions es troba la funció de transferència, 7.22., de la planta per a dissenyar el controlador que es podrà seguir a l'annex D. A la Figura 7.5 es mostra el diagrama de blocs que governarà el convertidor amb aquest nou llaç de control i els paràmetres del controlador resultant PI es mostra a les equacions 7.24. La planta que s'utilitza per el disseny del controlador és la corresponent a les variables \hat{v}_q i \hat{v}_d .

$$\begin{pmatrix} i_{1q} \\ i_{1d} \end{pmatrix} = G \begin{pmatrix} \hat{v}_q \\ \hat{v}_d \\ i_{motorq} \\ i_{motord} \end{pmatrix} \quad (7.22)$$

$$G = C(SI - A)^{-1}B + D \quad (7.23.)$$

$$G = \begin{pmatrix} \frac{1}{(L_2 + L_1)s + r_2 + r_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(L_2 + L_1)s + r_2 + r_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L_2 s + r_2}{(L_2 + L_1)s + r_2 + r_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{L_2 s + r_2}{(L_2 + L_1)s + r_2 + r_1} \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \\ K_p = \frac{L_1 + L_2}{\lambda} \\ K_i = \frac{r_1 + r_2}{\lambda} \end{cases} \quad (7.24.)$$

Es pot veure com la planta està desacoblada per a cada variable i cada eix, com es buscava amb el canvi de variable. A més, per a una mateixa variable s'obté la mateixa planta per a cada eix amb el que el controlador dissenyat serà igual per els dos eixos qd. Com en el cas anterior les dos intensitats de referència per el control de corrent s'hauran

de trobar a partir del llaç de control per la tensió al bus DC i la consigna de potència reactiva desitjada al punt de mesura del primer llaç de control de corrent.

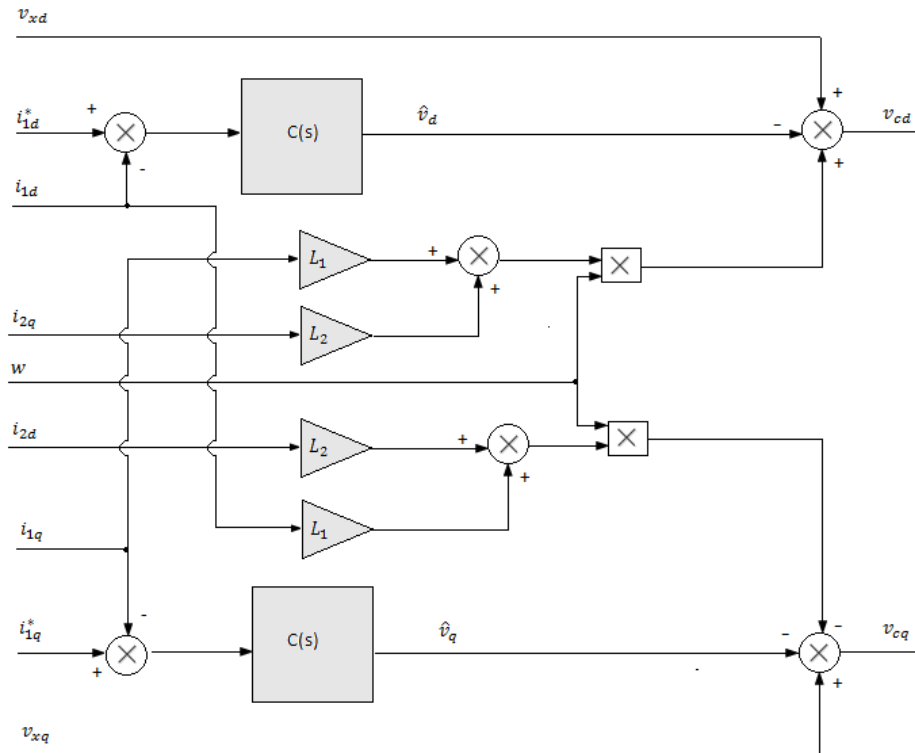


Figura 7.5 Diagrama de blocs del control sobre el corrent dissenyat

Es tornarà a fer nul·la la component v_{xq} del punt de mesura i, com la potència reactiva desitjada en aquest punt ha de ser zero: la consigna d'intensitat en component q per la intensitat al punt de mesura també ha de ser zero, $i_{1q}^* = 0$.

Pel control de la tensió del bus DC on la sortida del controlador és la intensitat de referència en l'eix d, i_{1d}^* , s'ha de seguir mantenint les hipòtesis presentades al anterior control, però ara el llaç necessita d'alguna simplificació més. La Figura 7.5 mostra el nou llaç per a dissenyar el controlador.

Com es força la component de la tensió en l'eix q a zero al punt de mesura, les dues components de la intensitat en borns del convertidor són diferents de zero i tenen aportació en el balanç de potència del convertidor. Les equacions que permeten obtenir el diagrama de blocs de la Figura 7.6 són 7.25 i pel propi diagrama de blocs el disseny del



controlador dona el mateix convertidor PI per assegurar un error nul. El controlador es mostra a les equacions 7.14-15 que es repeteixen per conveniència.

$$\begin{cases} P_c = P_{DC} \\ k = \frac{v_{cd}}{E}; C = \frac{v_{cq}}{E} \\ i_{DC} = \frac{3k}{2} i_{2d} + \frac{3C}{2} i_{2q} \end{cases} \quad (7.25.)$$

$$K_{pE} = \frac{4C\xi_E w_E}{3k} \quad (7.14.)$$

$$K_{iE} = \frac{2Cw_E^2}{3k} \quad (7.15.)$$

Aquest control s'ha realitzat gràcies a una sèrie d'hipòtesis que s'han suposat certes. En les simulacions que es realitzaran a continuació s'haurà de comprovar que aquest controlador treballa de la manera desitjada. Més endavant es mostrarà que aquest llaç de control per al model sense simplificar funciona adequadament i que, per tant, les hipòtesis són acceptables.

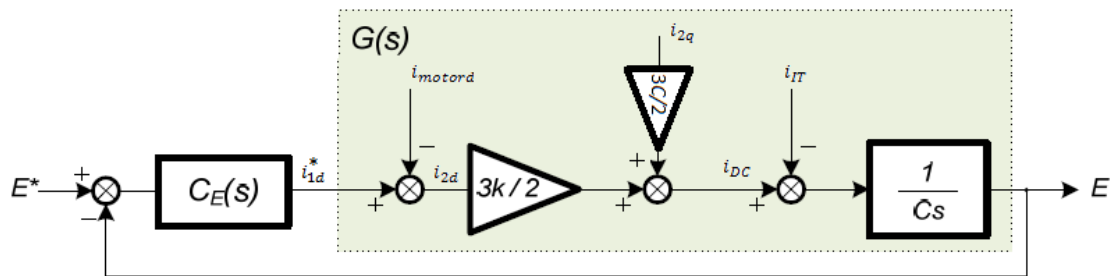


Figura 7.6 Diagrama de blocs del control sobre la tensió del bus DC dissenyat

8. Consideracions i Plantejament de Simulacions

Per a poder realitzar l'estudi amb els elements presentats anteriorment, s'implementarà un model d'esquema elèctric corresponent al centre de dades de cada TIER y s'obtidran resultats orientatius d'eficiència per a poder comparar els diferents mètodes de compensació. La implementació dels models es mostra a l'annex E.

Es recordaran les consideracions de la modelització de cada TIER del centre de dades i, a continuació, es comentaran els diferents mètodes de compensació de reactiva proposats per analitzar una possible millora de l'eficiència. Es resumeixen els següents punts a la Figura 8.1.

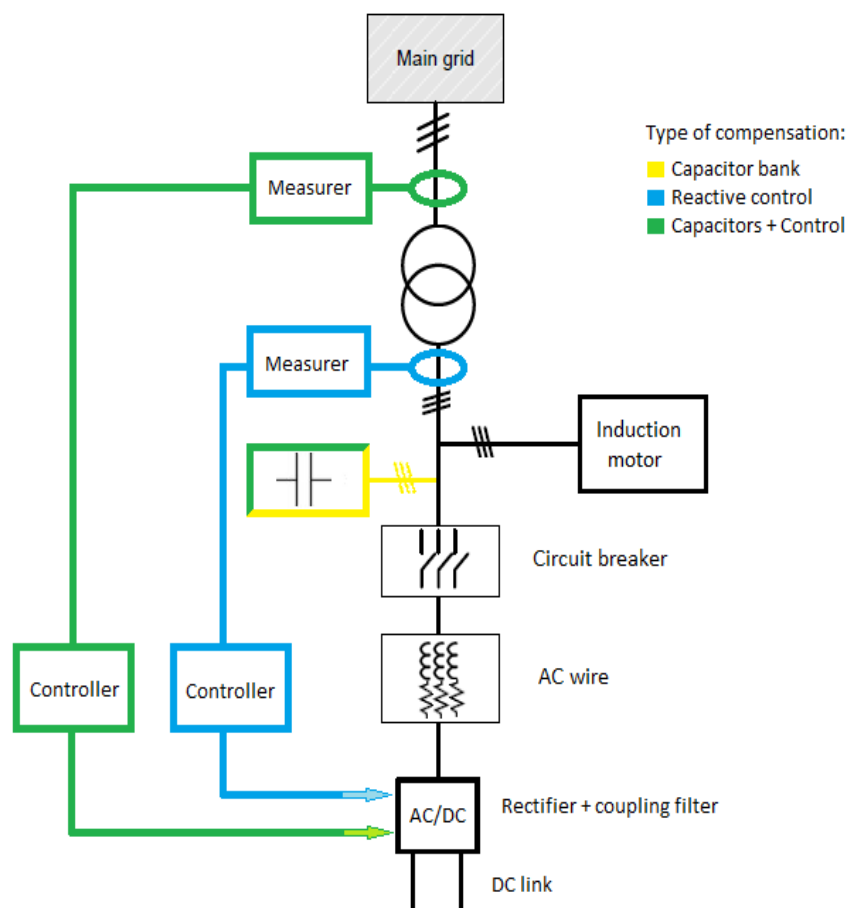


Figura 8.1 Esquema elèctric resum de les alternatives de compensació



Com s'havia comentat a capítol 6, el TIER més senzill, el TIER 1, no presenta cap redundància, ni en les línies de distribució ni en les UPS, per tant el model estarà format per un transformador, un motor d'inducció que representi el chiller i altres motors del sistema de refrigeració, uns interruptors de protecció, el cable i el convertidor amb el seu filtre inductiu tal com es mostra a la Figura 8.1. A la pràctica, encara que el TIER 2 i el 3 tinguin redundàncies en la UPS, es considerarà com un únic convertidor que representi a totes les del centre de dades per on passa tota la càrrega necessària IT. A més, pel cas de redundàncies al TIER 3 a les línies de distribució, es nota que no hi ha UPS presents a la segona línia. Tanmateix, aquesta només està activa en cas que la branca amb les UPS fallés o estès en manteniment. Amb aquestes consideracions i apunts s'obté que el model per als tres TIERS és el mateix, però cadascun escalat a la potència que requereix i amb el nombre de motors de cada centre de dades.

A diferència dels anteriors, el TIER 4 està dissenyat per treballar amb les dues branques de distribució actives i presenta UPS en les dues branques. A més, cada branca s'ha dissenyat per poder funcionar i suportar la càrrega integral del centre de dades per si alguna de les dos fallés, per tant calen unes consideracions diferents a l'hora de modelitzar-lo. En definitiva es buscarà reduir el model al d'una branca com el que s'utilitza als demés TIERS.

Primerament, es dissenyarà una línia de distribució de manera que pugui carregar tota la potència del centre de dades i d'aquesta s'extraurà la dimensió del banc de condensadors que ha de connectar-se o el sobredimensionat del convertidor. Aleshores en aquesta branca, les simulacions es realitzaran fent passar la meitat de la demanda de potència pel TIER 4.

Al fer passar la meitat de la potència per cada branca fa que els condensadors realment connectats hagin de ser més petits que els implementats. Així, s'ha escollit la grandària dels condensadors connectats a partir de fer treballar les línies a la meitat de potència. Quan una de les branques s'utilitza per a suportar tota la càrrega, s'han de connectar els condensadors addicionals instal·lats que estaven desconnectats.

Per cada tipus de centre de dades s'ha estimat una potència nominal consumida pels servidors, aquesta es pot veure a la Taula 8.1, amb l'estimació de la potència que consumeix el centre de dades a partir del pont en DC de la UPS. Com és lògic, per a cada potència del centre de dades hi ha una demanda relacionada del sistema de refrigeració.

Taula 8.1 Potència consumida als servidors i Potència al bus DC

TIER	POTÈNCIA SERVIDORS [kW]	POTÈNCIA AL BUS DC [kW]
1	24	30
2	120	150
3	400	500
4	2000	2500

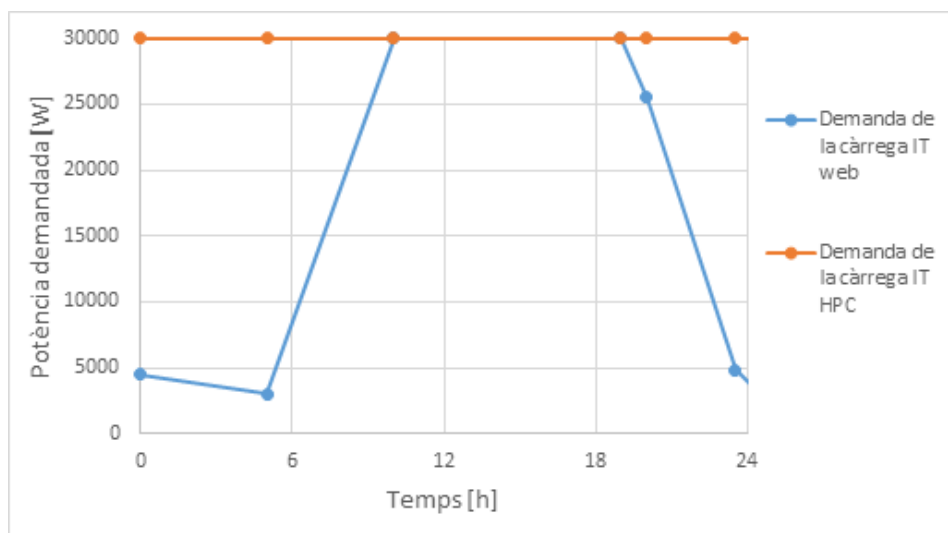


Figura 8.2 Potència consumida al bus DC per a un TIER 1 tipus HPC i tipus web

En les simulacions de cada TIER es diferenciarà entre centres de dades on la càrrega IT es manté a la practica constant, com el que pot donar servei a un centre de computació d'alt rendiment (HPC); amb el que la càrrega varia de manera significativa, com el que pot donar un servidor web, on la demanda és més gran en hores de sol i molt baixa durant la nit. Un exemple de la demanda del centre de dades TIER 1 per a un tipus HPC i un tipus servidor web es veu a la Figura 8.2



En canvi només es disposa d'una corba de refrigeració que s'ajusta més al comportament en un centre de dades tipus HPC, però que a efectes s'utilitzarà en les simulacions dels dos tipus de càrrega, HPC i web. Les corbes de demanda de potència consumida per les càrregues IT i de potència de refrigeració presenten la mateixa forma, però estan escalades per les diferents potències nominals dels TIERs. A la Figura 8.3 es mostra la demanda de la potència mecànica dels motors de refrigeració del centre de dades TIER 1.

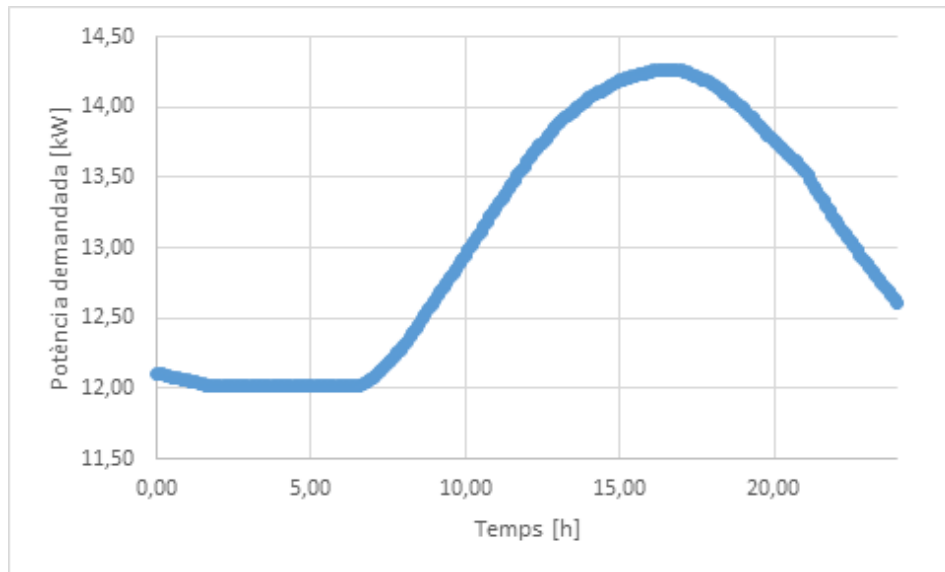


Figura 8.3 Demanda dels motors de refrigeració per a un TIER 1

8.1. Compensació amb banc de condensadors

Aquesta opció de compensació de reactiva és la alternativa clàssica en el disseny de centres de dades, com a exemple, es pot veure al catàleg de solucions de l'empresa "Legrand" [43].

La posició dels condensadors, al lliurable "D4.3 Catalogue of advanced technical concepts for Net Zero Energy Data Centres" [2] es proposa al propi punt de connexió amb la xarxa en paral·lel amb la instal·lació. En un anàlisi qualitatiu d'aquesta proposta es pot arribar a la conclusió que milloraria el factor de potència al punt d'acoblament del banc de condensadors amb la xarxa, però les pèrdues de potència a la instal·lació seran les mateixes que si no hi hagués aquest element de compensació, a les que s'haurà de sumar també un petit consum dels condensadors.

Vists els problemes exposats, s'ha proposat una posició més interessant on es podrien col·locar els condensadors. Els condensadors compensaran directament els motors d'inducció del model. Aquesta configuració evitaria que la potència reactiva consumida per les càrregues mecàniques provingués de la xarxa i seria proporcionada per el banc de condensadors. Com a conseqüència, les corrents que travessen el transformador disminuirien i així també les pèrdues del model. A més, el factor de potència no serà tan bo com la opció anterior, però al anular la potència reactiva consumida pel motor, el factor de potència al punt de connexió amb la xarxa no serà tan diferent. S'ha comprovat per simulació aquesta nova posició dels condensadors.

8.2. Compensació amb control de potència reactiva

Un dels principals objectius d'aquest projecte és estudiar si es possible substituir un dispositiu dedicat a la compensació de potència reactiva per un control sobre el convertidor costat xarxa de la UPS, fent-lo treballar com una STATCOM. Aquest escenari s'estudiarà en aquesta fase on s'extreu el banc de condensadors i s'implementa el control dissenyat.

La principal diferència entre aquest mètode de compensació i l'ús de condensadors és que la potència reactiva aquest cop no s'injecta directament als motors d'inducció, sinó que aquesta flueix des de la UPS fins els motors. Això provoca que la intensitat en aquest tram sigui més gran i, per tant, que les pèrdues també creixin. Sabent això, resulta en l'estudi del balanç entre les pèrdues produïdes per aquesta proposta envers a les produïdes directament pels condensadors. Es veurà doncs si val la pena estalviar-se el banc de condensadors per sobredimensionar el convertidor.

Com en el cas anterior, existeixen dues posicions principals on es pot desplegar el control: la connexió de la instal·lació amb la xarxa i el punt de connexió dels motors a l'esquema elèctric. En ambdós casos serà necessari la instal·lació al centre de dades de dispositius addicionals de mesura per necessitats del control dissenyat. Encara que aquests dispositius suposaran un cost addicional, es negligiran el cost addicional d'instal·lació en ser molt menors al cost principal que és el sobredimensionat del convertidor. La configuració que s'utilitzarà serà la de col·locar el control al mateix punt que els condensadors ja que ofereix unes pèrdues energètiques menors, comprovat a partir de simulació de l'esquema modelitzat.



8.3. Compensació amb banc de condensadors i control de reactiva

L'estudi inicial de les dues alternatives anteriorment presentades va donar lloc a un tercer plantejament, a priori no considerat en els objectius inicials del projecte. La idea darrera d'aquest tipus de compensació neix d'investigar més a fons la posició dels condensadors, passant-los del punt de connexió de la xarxa a compensar els motors d'inducció, on dona lloc a acoblar el llaç de control dissenyat.

Per una banda, col·locant el control al punt de connexió a la xarxa assegura un factor de potència unitat i la potència reactiva que consumeix tot el sistema es proporciona pel banc de condensador i el convertidor de la UPS. Aquest plantejament pretén reduir les pèrdues energètiques en aquest tram del centre de dades jugant amb que la potència reactiva no travessi el transformador, on hi ha de passar el gruix de potència activa. Això provoca que les pèrdues al cablejat i interruptors de protecció sigui una mica més alta, però les pèrdues al transformador siguin més baixes.

Per altre banda, implementar el control sobre el convertidor i que aquest passi a generar potència reactiva porta a haver de sobredimensionar el dispositiu. A més, es necessita un altre punt on es mesuren les tensions i corrents necessaris pel disseny del propi control que també portaran associats uns costos d'instal·lació. Tot i això, els nous elements que s'han d'instal·lar són per una instal·lació de baixa tensió i el seu cost serà baix, per tant es negligirà i només es tindrà en compte el cost de sobredimensionar el convertidor.

9. Estudi de la millora en l'eficiència

A continuació es plantejaran els diferents resultats de simular els dos tipus de càrrega IT, tipus HPC i web, per a cada TIER de centre de dades i per a cada alternativa de compensació de reactiva exposat.

Per a les simulacions es coneixen els perfils de càrrega IT i els perfils de la demanda de potència mecànica necessària pel sistema de refrigeració. Un inconvenient és que només es disposa dels perfils de potència de refrigeració per a centres de dades més propers a un HPC que a un tipus web i, per tant, la potència de refrigeració no es correspondrà per a instants de temps on la potència demandada IT és molt baixa. Però, sí que es una bona aproximació de demanda de refrigeració quan la potència IT abandona la regió de potència baixa. Per a validar si el centre de dades dissenyat en cada cas és una bona aproximació a un de real es calcularà el PUE mitjà en cada centre de dades pel cas de càrrega HPC.

Com el càlcul del PUE només seria ajustat en centres de dades tipus HPC, per a poder comparar els resultats del tipus web es calcularà l'eficiència per a totes les diferents simulacions mitjançant la fórmula 4.2 exposada a 4.3. Mètriques per estimar l'eficiència energètica.

Aleshores, per a poder fer una comparació s'utilitzarà la mateixa mètrica per tots els anàlisis i es deixarà de banda la mètrica PUE. Al utilitzar una mateixa manera per a calcular l'eficiència, permetrà comparar les diferents opcions de compensació i tenir una idea del canvi entre HPC i web.

Per a cada simulació es considerarà un interval de temps d'un dia com a referència de funcionament normal durant tot l'any. Aquesta és una hipòtesis de l'estudi ja que durant l'any pot ser que les demandes IT i de refrigeració no siguin sempre les mateixes a causa de la quantitat de variables que intervenen en la seva confecció com la temperatura exterior de l'edifici, l'emplaçament, la càrrega de treball, entre d'altres.

9.1. Anàlisis del TIER 1

En la primera simulació del model d'un centre de dades TIER 1 sense cap compensació de reactiva es calcularà el PUE pel cas de càrrega IT constant d'un tipus HPC per a comprovar si el model és una bona aproximació. A la Taula 9.1 es mostra la potència activa mitjana (P),



la potència reactiva mitjana (Q) i el PUE mitjà per un TIER 1 sense compensació mesurat al punt de connexió de l'edifici a la xarxa elèctrica.

Taula 9.1 Principals resultats d'un TIER 1 sense compensació de reactiva

TIPUS	P MITJANA [kW]	Q MITJANA [kvar]	FACTOR DE POTÈNCIA	PUE MITJÀ
HPC	47,409	23,678	0,8946	1,975

Primerament, el PUE mitjà obtingut en la simulació està comprès a l'interval entre 1,6 i 2 que s'havia establert com a referència d'un centre de dades real i, conseqüentment es pot determinar que el model és una bona aproximació. També cal esmenar que aquest càlcul depèn de la potència IT que es considera que arriba als servidors, en aquest cas 24 kW dels 30 kW al bus DC. De totes maneres el PUE està dins de l'interval d'acceptació, tot i estar pràcticament a la frontera. Aquest PUE disminuirà en les demès simulacions ja que al introduir elements de compensació es preveu que disminueixi les pèrdues a l'esquema. A més, es veu com la potència reactiva mitjana és prou gran com per plantejar la seva compensació, essent un 50% de la potència activa mitjana.

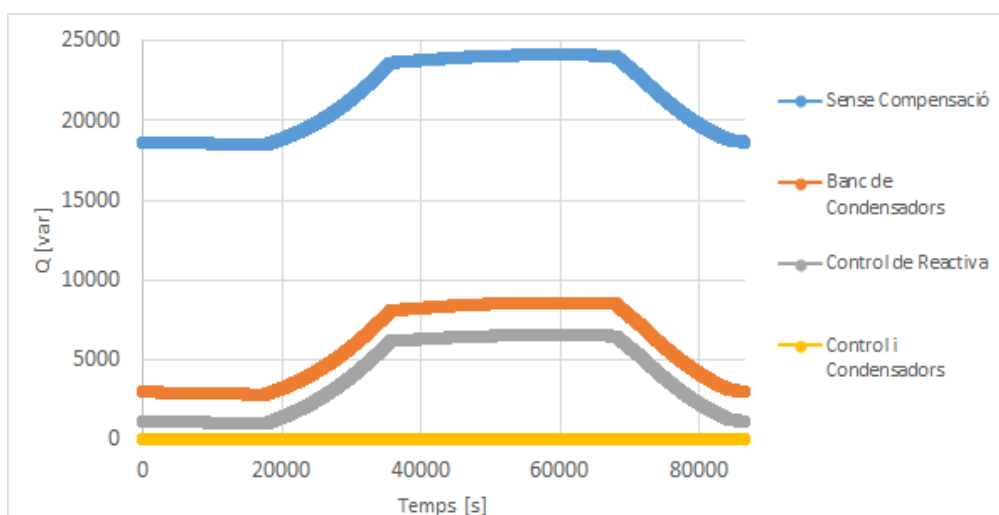


Figura 9.1 Potència Reactiva en la simulació d'un dia en un TIER 1 tipus web

Amb aquesta prèvia validació es passa a presentar els resultats on es compararan els diferents sistemes de compensació. A la Figura 9.2 i Figura 9.1 es veu la potència reactiva durant la simulació d'un dia amb les diferents compensacions i la del model sense compensació. En aquesta figura es pot veure com aquesta potència va disminuint amb els diferents mètodes de compensació fins que es fa zero en l'alternativa del control al punt de connexió a la xarxa. Que la potència reactiva sigui nul·la notifica que el control, dissenyat a partir d'aproximacions, funciona correctament. Les últimes comprovacions per a donar per vàlid el control dissenyat és veure que la tensió al bus de continua es manté al valor de referència introduït i que les tensions i corrents del convertidor AC/DC no són més grans que les nominals per a que aquest no sature.

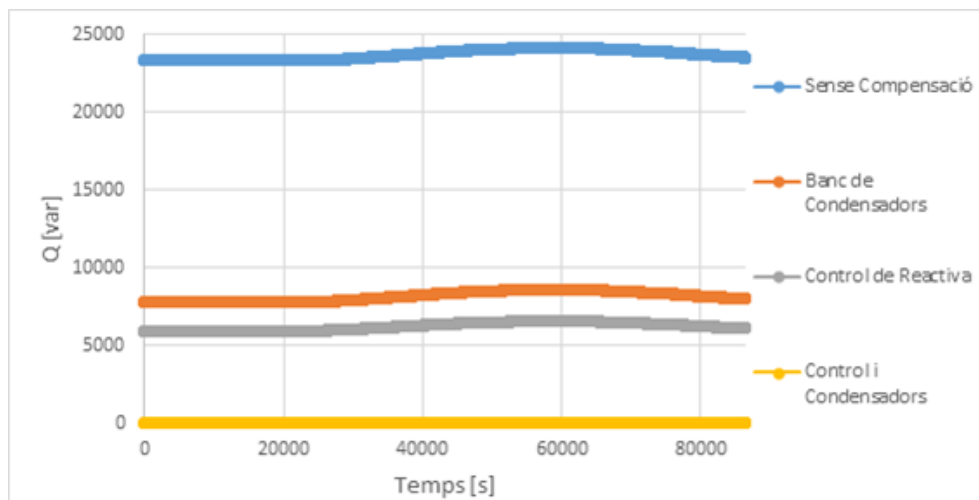


Figura 9.2 Potència Reactiva en la simulació d'un dia en un TIER 1 tipus HPC

A la Figura 9.4 s'expressa l'eficiència en cada instant de la simulació per a un tipus HPC i a la Figura 9.3 l'eficiència d'un tipus web. D'aquestes figures s'observa que l'eficiència és més alta quan el centre de dades treballa a més càrrega. A més, totes les simulacions dibuixen quasi la mateixa gràfica però desplaçada una certa constant, la qual serà l'increment d'eficiència al passar d'una alternativa de compensació a una altre. Aquests increments i les pèrdues mitjanes a l'esquema queden registrats a la Taula 9.2.



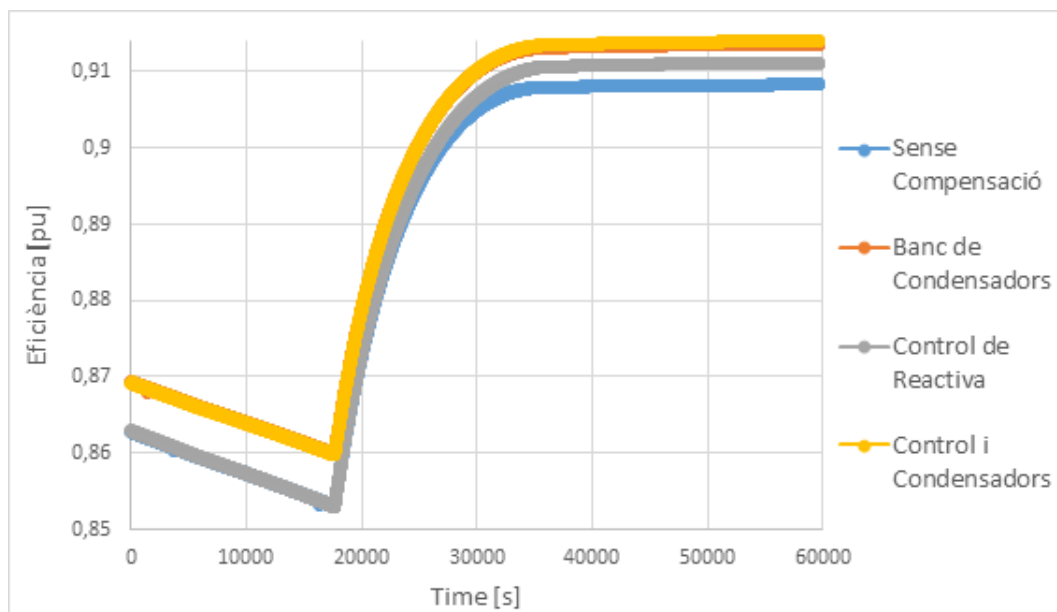


Figura 9.3 Eficiència en un TIER 1 tipus web en mig dia de simulació

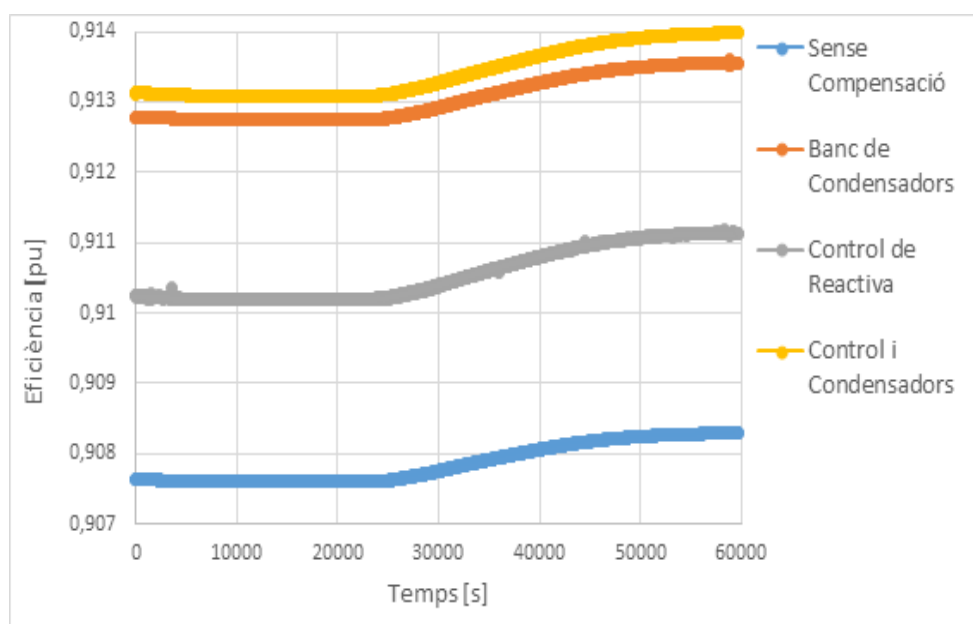


Figura 9.4 Eficiència en un TIER 1 tipus HPC en mig dia de simulació

La potència perduda no varia gaire d'una opció a una altre, però el centre de dades esdevé més eficient quan s'adopta l'opció de combinar el nou control sobre el convertidor amb els condensadors. El mateix control, però sense condensadors, com a únic element per compensar la potència reactiva és més eficient que si no es tingues compensació, encara que és menys eficient que l'opció clàssica de col·locar bancs de condensadors. Això es degut a que amb els condensadors s'injecta potència reactiva al sistema al punt de connexió d'aquests mentre que amb el control el que es fa és alimentar el sistema amb la mateixa reactiva, però ara fent-la fluir des del convertidor a l'esquema. En cas d'escollir la opció més eficient aquesta seria la del controlador amb el banc de condensadors, però al següent apartat es mostrarà un petit anàlisi per determinar si és viable també econòmicament. Les dues figures de l'eficiència es repeteixen per els següents TIERs amb la mateixa forma, però desplaçades.

Taula 9.2 Increment d'eficiència en % en un TIER 1

TIPUS	CONDENSADORS (1)	CONTROL DE REACTIVA	CONDENSADORS I CONTROL (2)	DE (1) A (2)
HPC	0,5200	0,2712	0,5578	0,03789
WEB	0,5628	0,1627	0,5800	0,01688

9.2. Anàlisi del TIER 2

Es procedeix de la mateixa manera que per el primer TIER mostrant els principals resultats per la simulació sense cap compensació del punt de mesura de la connexió a la xarxa per a validar si el model per aquest centre de dades s'ajusta a un de real. A la Taula 9.3 es mostren aquests resultats.



Taula 9.3 Principals resultats d'un TIER 2 sense compensació de reactiva

TIPUS	P MITJANA [kW]	Q MITJANA [kvar]	FACTOR DE POTÈNCIA	PUE MITJÀ
HPC	225,89	90,011	0,9290	1,882

En aquest cas el PUE torna a estar a l'interval d'acceptació del model entre 1,6 i 2. A diferència del resultat del TIER 1, ara allunyat de la frontera superior de l'interval. La potència reactiva és del 40% de la potència activa mitjana, inferior en tant per cent a la trobada a l'anterior model. Pels resultats obtinguts, possiblement aquest esquema sigui més fidel a la realitat per a un centre de dades real, però els dos s'accepten com a possibles.

S'ha comprovat per a cada simulació que els controls dissenyats sobre el convertidor funcionen correctament. Tant en el punt on es vol compensar la reactiva en el cas que el convertidor hagi de generar reactiva, com la tensió del bus DC es mantingui constant al valor de referència. També observar si aquest convertidor no satura fent que les tensions i corrents estiguin per sota de la nominal.

A la Figura 9.6 i Figura 9.5 es mostra l'evolució de l'eficiència per a una càrrega web i una HPC en els diferents escenaris de compensació. Ambdues figures mostren eficiències més elevades a les trobades al TIER 1, però la corba presenta la mateixa forma essent més eficient quan treballa a més càrrega.

El canvi en les corbes és lleu, fent que l'increment entre els diferents casos simulats siguin més baixos al cas anterior. A la Taula 9.4 es recullen els increments d'eficiència entre el model sense compensació i amb les demés propostes, a més de l'increment que apareix al canviar de condensadors a sumar-li el control de reactiva.

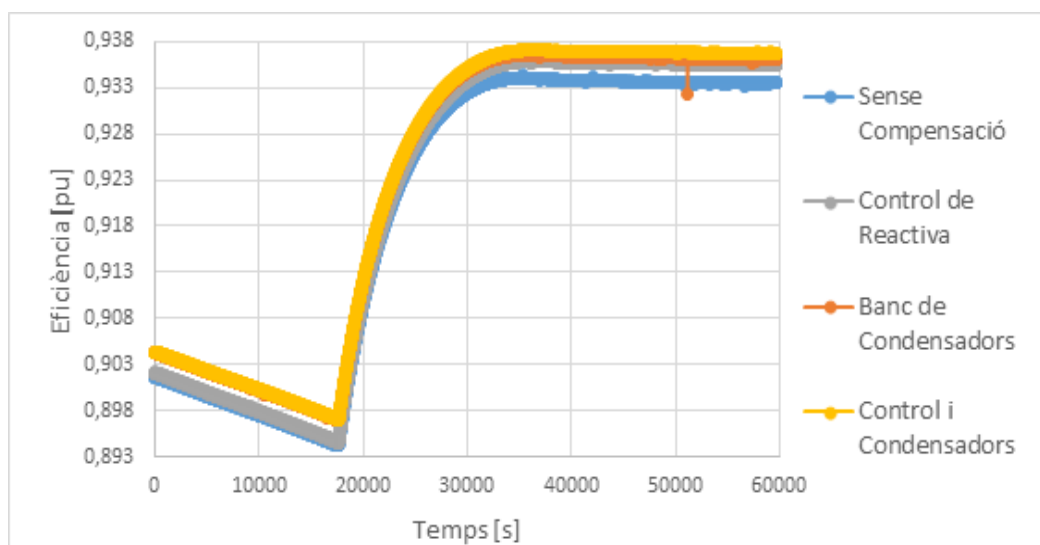


Figura 9.5 Eficiència en un TIER 2 tipus web en mig dia de simulació

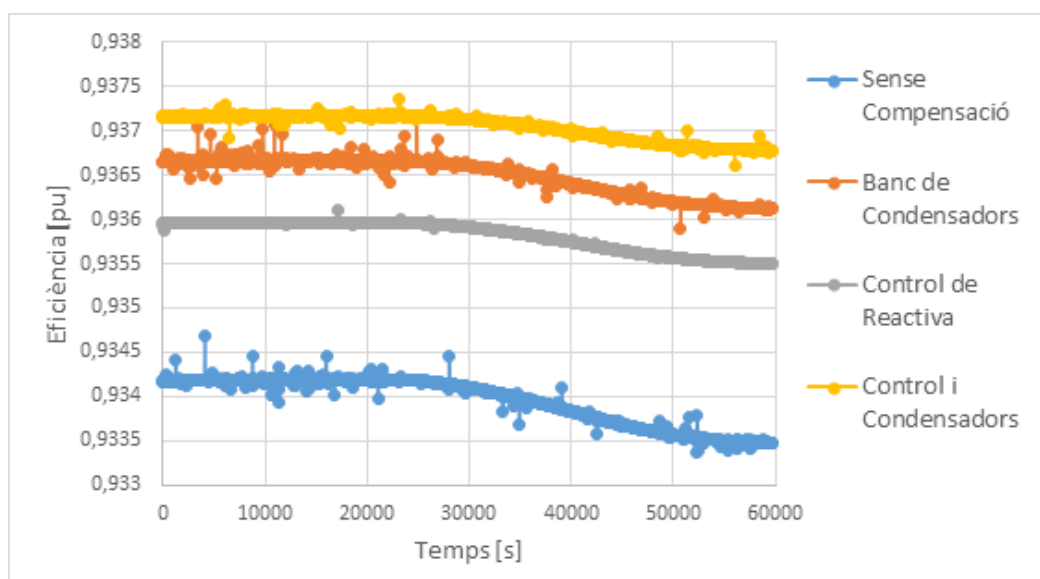


Figura 9.6 Eficiència en un TIER 2 tipus HPC en mig dia de simulació



Taula 9.4 Increment d'eficiència en % en un TIER 2

TIPUS	CONDENSADORS (1)	CONTROL DE REACTIVA	CONDENSADORS I CONTROL (2)	DE (1) A (2)
HPC	0,2537	0,1860	0,3092	0,05548
WEB	0,2557	0,1211	0,2891	0,03340

Encara que els increments en l'eficiència en tant per cent són baixos, com la càrrega consumida és gran, això porta a estalviar pèrdues de l'ordre de kilowatts. L'opció més eficient, alternativa a la del banc de condensadors, segueix sent la de combinar els condensadors amb el control de reactiva del convertidor.

9.3. Anàlisi del TIER 3

Seguint amb el procediment que s'ha seguit amb els altres TIERS, a la Taula 9.5 es mostra la potència activa (P), potència reactiva (Q), el factor de potència i el PUE mitjà d'un centre de dades TIER 3 sense compensació de reactiva mesurat al punt de connexió a la xarxa de l'edifici.

Taula 9.5 Principals resultats d'un TIER 3 sense compensació de reactiva

TIPUS	P MITJANA [kW]	Q MITJANA [kvar]	FACTOR DE POTÈNCIA	PUE MITJÀ
HPC	753,36	254,93	0,9472	1,884

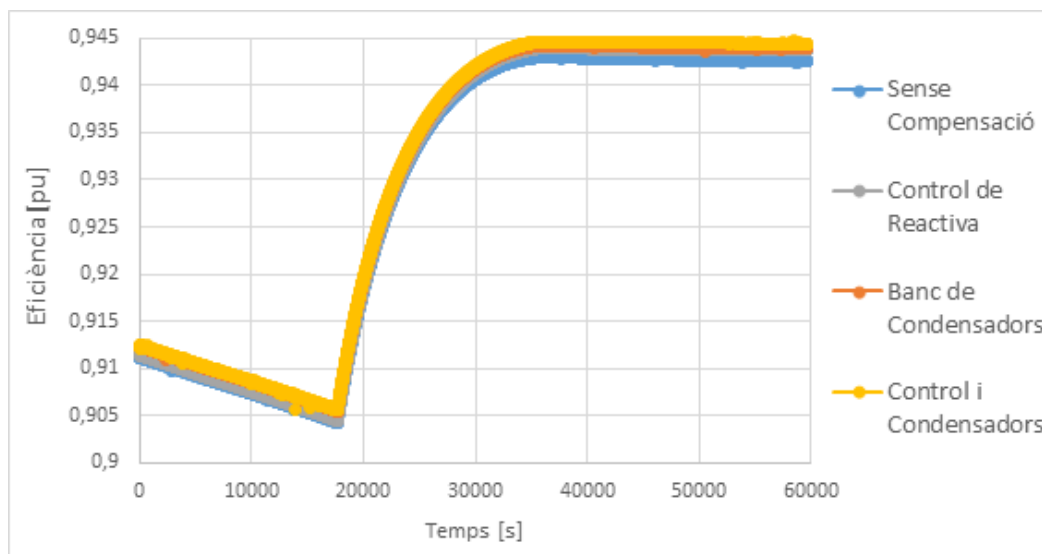


Figura 9.7 Eficiència en un TIER 3 tipus web en mig dia de simulació

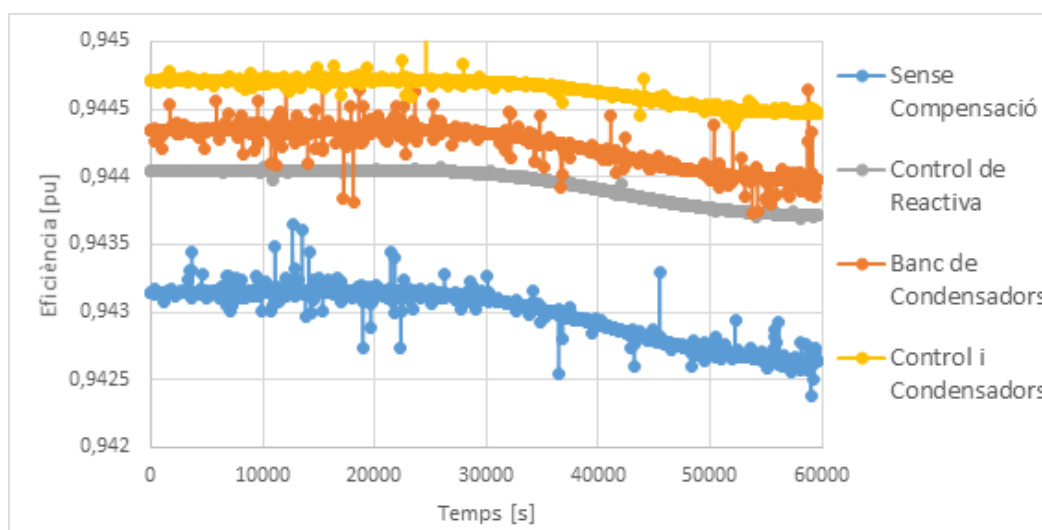


Figura 9.8 Eficiència en un TIER 3 tipus HPC en mig dia de simulació

El PUE mesurat és quasi idèntic al trobat al TIER 2 que està dins de l'interval acceptable i per tant es dona com a bo el model. La potència reactiva mesurada en aquest cas és del 34% de la potència activa mesurada. S'aprecia que el tant per cent de potència reactiva consumida pel centre de dades es va reduint a mesura que s'augmenta el TIER on, per exemple, pel tipus HPC la Q ha passat del 50 al 34% entre el TIER 1 al TIER 3. Una



conseqüència de que la Q al punt de connexió amb la xarxa sigui cada cop més petita en tant per cent és que el factor de potència augmenta.

A la Figura 9.8 i Figura 9.7 es mostra l'evolució de l'eficiència per a una càrrega HPC i una web en els diferents escenaris de compensació. Vists els dos anàlisis anteriors, s'intueix que hi ha una dependència dels increments d'eficiència amb el TIER ja que, tant per tipus HPC com per tipus web, les corbes descrites per les simulacions tenen la mateixa forma i són més eficients a mesura que s'incrementa el TIER. A més, els increments en l'eficiència són cada cop més estrets fent que les corbes quedin cada cop més juntes.

A la Taula 9.6 es recullen els increments d'eficiència entre el model sense compensació i amb les demás compensacions, a més de l'increment que apareix al canviar de condensadors a sumar-li el control de reactiva. Tot i que els increments són cada cop més petits, la millora que es presenta al passar de condensadors a control amb condensadors és quasi constant pels primers 3 TIERS.

Taula 9.6 Increment d'eficiència en % en un TIER 3

TIPUS	CONDENSADORS (1)	CONTROL DE REACTIVA	CONDENSADORS I CONTROL (2)	DE (1) A (2)
HPC	0,1485	0,1197	0,1896	0,04112
WEB	0,1205	0,06473	0,1474	0,02690

9.4. Anàlisis del TIER 4

Per acabar aquest primer anàlisis on es busca la configuració més eficient, s'estudiarà el TIER 4 on a la Taula 8 es mostren els principals resultats de la mesura per al model sense compensació de Q al punt de connexió amb la xarxa per un HPC per determinar si és una bona aproximació a un edifici real.

Taula 9.7 Principals resultats d'un TIER 4 sense compensació de reactiva

TIPUS	P MITJANA [kW]	Q MITJANA [kvar]	FACTOR DE POTÈNCIA	PUE MITJÀ
HPC	1736,16	461,64	0,9664	1,736

L'estudi sobre aquest TIER de centre de dades es simula sobre una sola branca de les dues línies de distribució que treballen, però els resultats es poden extrapolar a les dues línies al treballar cada una simètricament. En aquest cas el PUE és el més baix dels mesurats pels models anteriors, per tant, el model es considera acceptat per a poder estudiar l'eficiència amb les diferents alternatives de compensació. La Q passa a ser el 27% de la potència activa que corrobora l'afirmació que el tant per cent disminueix a mesura que augmentem el TIER.

En aquest TIER les gràfiques de l'eficiència segueixen tenint la mateixa forma, però el marge és tan estret que quasi queden solapades. Com s'havia vist en el TIER anterior l'increment obtingut al combinar els condensadors amb el control en comptes de la solució convencional de només tenir el banc de condensadors s'havia mantingut quasi constant. No és el cas d'aquest TIER on l'increment passa a ser 10 cops més petit. A la Taula 9.8 es recullen els increments d'eficiència entre el model sense compensació i amb les demés compensacions, a més de l'increment al canviar de condensadors a sumar-li el control de reactiva. Tot i que el guany en eficiència sigui molt petit en tant per cent, al tenir un consum de l'ordre de megawatts, es tradueix en reduccions de les pèrdues de potència de kilowatts.

Taula 9.8 Increment d'eficiència en % en un TIER 4

TIPUS	CONDENSADORS (1)	CONTROL DE REACTIVA	CONDENSADORS I CONTROL (2)	DE (1) A (2)
HPC	0,0300	0,0146	0,0338	0,00382
WEB	0,0284	0,00142	0,0307	0,00236



10. Anàlisis econòmic comparatiu per tots els TIERS

En el capítol anterior s'ha simulat cada centre de dades per cada tipus de càrrega IT i per cada estratègia de compensació de potència reactiva i, encara que són diverses simulacions diferents, s'ha extret la mateixa resposta qualitativa en tots els TIERS: la opció més eficient és combinar el control de reactiva dissenyat al convertidor amb un banc de condensadors. En aquest apartat es comprovarà mitjançant un petit estudi econòmic si, a més de ser més eficient energèticament, és una bona opció en termes econòmics per aquest tipus d'edificis. El mètode de compensació on només hi tenia part el control de reactiva sense els capacitors es desestima d'aquest estudi ja que s'ha vist que no és una opció que millori l'eficiència envers a la instal·lació d'un banc de condensadors, encara que la potència reactiva consumida de la xarxa sigui més baixa per a l'alternativa del control.

Aquest anàlisis comparatiu entre els dos mètodes més eficients, condensadors sols i amb el control de reactiva, es realitzarà reproduint una part de la factura que haurà de pagar l'edifici per consum d'electricitat. Aquesta part de la factura que s'estimarà amb les simulacions només tindran en compte aquells apartats que variaran en optar d'un mètode a un altre ja que hi haurà termes de la factura que es considera que no variaran, a priori, de forma significativa.

La manera de calcular la factura s'extreu del Butlletí Oficial de l'Estat (BOE) on s'estableixen les tarifes i els procediments per a calcular-la. També s'ha buscat una visió general d'aquesta factura al llibre [44], encara que els paràmetres actualitzats s'han aconseguit al BOE. Els termes a calcular seran els corresponents a la facturació bàsica, que engloba els components de facturació de potència contractada i facturació d'energia, i, dels complements tarifaris que penalitzen o bonifiquen la facturació bàsica, només es calcularà el corresponent al que engloba la energia reactiva i el factor de potència, que és el que realment es canvia d'un mètode al següent. Els complements per estacionalitat o per interrompibilitat no es consideren significatius ja que variaran menys que els termes esmenats anteriorment.

Per a poder realitzar l'estudi es reproduiran un total de tres factures: una primera corresponent al centre de dades sense cap compensació, la del centre de dades actual

compensat per condensadors i la proposta d'incorporar el control conjuntament amb els condensadors. Aquestes tres són necessàries ja que es farà una primera comparació dels beneficis que s'obtenen quan es passa de no tenir compensació a tenir-ne amb els condensadors i la segona comparació d'aquest salt des de els condensadors a la nova proposta més eficient.

La metodologia per a la confecció de les tres factures és la mateixa. Per a determinar la facturació bàsica cal establir en quina tarifació s'engloben els centres de dades i seguint aquesta tarifa s'establiran els coeficients per el càlcul de la facturació bàsica per la potència i l'energia. Un cop obtinguda la facturació bàsica, es passarà al càlcul de la bonificació o penalització d'aquesta facturació mitjançant el terme de complement tarifari relacionat amb el factor de potència de la instal·lació. Aquest càlcul ve determinat pel BOE actual [45] [46] [47].

Per a una instal·lació connectada a baixa tensió, menys d'un kilovolt, i amb una potència contractada superior a 15 kW en algun dels tres períodes horaris, li correspon un grup tarifari 3.0TD. Aquest peatge consta de tres períodes horaris que comporten tres termes de potència i tres termes d'energia. Tanmateix, les potències contractades en els diferents períodes seran tals que la potència contractada per el període $n+1$ ha de ser sempre major o igual a la contractada al període anterior n . La potència contractada en cada període horari considerada per a la factura s'escollirà com la màxima entre la potència màxima que es dona en cada període i la potència contractada al període anterior.

Amb les formules presentades a l'annex F, es procedeix a confeccionar les tres factures necessàries per a comparar els mètodes de compensació d'interès. Primerament, l'estudi dels beneficis econòmics que porta la implementació dels bancs de condensadors i finalment el salt als bancs de condensadors i la compensació de reactiva.

10.1. Anàlisi de no tenir compensació a tenir condensadors

En aquests anàlisi es presentaran els resultats obtinguts en la confecció de la factura. Per una banda els estalvis que porten el fer més eficient l'edifici en la facturació bàsica i per l'altre els beneficis que s'extreuen del complement tarifari que es calcula. Al final es farà un balanç amb els principals costos d'implementar la compensació per veure si el balanç és positiu, s'obtenen beneficis amb aquesta estratègia, o genera pèrdues.



A la Taula 10.1 es presenten els resultats del càlcul de la facturació bàsica exposats a l'inici del capítol. S'exposa més detalladament aquest càlcul a l'annex F. En aquesta taula es mostra l'estimació de la factura en un any per a cada TIER i cada tipus de càrrega IT tenint en compte que els resultats d'un dia s'extrapolen a la resta de l'any i els diferents períodes horaris de punta; pla i vall, amb els dies abans esmenats sencers en horari de vall.

Taula 10.1 Facturació bàsica sense compensació vs. condensadors

TIER	TIPUS DE CÀRREGA IT	FACTURACIÓ BÀSICA SENSE COMP. [€]	FACTURACIÓ BÀSICA AMB CONDEN. [€]	ESTALVI FACTURACIÓ BÀSICA [€]
1	HPC	7945,33	7900,36	44,97
1	Web	7256,86	7215,94	40,92
2	HPC	37862,32	37763,28	99,04
2	Web	34484,81	34395,29	89,52
3	HPC	126322,58	126165,49	157,09
3	Web	115183,26	115042,38	140,88
4	HPC	580581,08	580409,80	171,28
4	Web	525898,46	525746,44	152,01

A continuació, a la Taula 10.2, es presenta les bonificacions en la facturació complementària calculada a partir del factor de potència mitjà de la instal·lació. Cal remarcar que si una bonificació a la taula és negativa vol dir que és un recàrrec a pagar de més a la factura.

Taula 10.2 Bonificació sense compensació vs. condensadors

TIER	TIPUS DE CÀRREGA IT	BONIFICACIÓ SENSE COMPENSACIÓ [€]	BONIFICACIÓ AMB CONDENSADORS [€]	ESTALVI EN ELS COMPLEMENTS [€]
1	HPC	-34,59	228,85	263,44
1	Web	-472,42	216,74	689,16
2	HPC	0	1028,80	1028,80
2	Web	-285,59	1016,03	1301,63
3	HPC	0	3727,68	3727,68
3	Web	0	3717,49	3717,49
4	HPC	8024,33	21892,83	13868,50
4	Web	0	20184,94	20184,94

S'observa que l'estalvi en aquest concepte és més important que el que provoca la reducció de les pèrdues en la facturació bàsica. En l'última taula d'aquest apartat, Taula 10.3, es presenta: el sumatori entre els dos estalvis donant per a cada TIER i tipus de càrrega, el principal cost d'instal·lació que és la compra del banc de condensadors i, tenint en compte que la vida útil d'aquest banc és superior a 10 anys, es fa un balanç en un horitzó de 10 anys per determinar si hi ha beneficis o pèrdues al adoptar aquesta compensació.

Evidentment, aquesta mesura comporta grans beneficis econòmics i períodes de retorn molt baixos, més baix que 1 any, i és per això que els centres de dades en comptes de romandre sense compensar la seva potència reactiva, s'opta per compensar amb bancs de condensadors que aportaran beneficis en la factura de l'edifici.



Taula 10.3 Balanç econòmic entre la opció sense compensació vs. amb condensadors

TIER	TIPUS DE CÀRREGA IT	ESTALVI TOTAL [€]		PRINCIPAL COST [€]	BALANÇ ECONÒMIC [€]
		En 1 any	En 10 anys		
1	HPC	308,41	3084,1	218	2866,1
1	Web	730,08	7300,8	218	7082, 8
2	HPC	1127,84	11278,4	450	10828,4
2	Web	1391,14	13911,4	450	13461,4
3	HPC	3884,77	38847,7	1198	37649,7
3	Web	3858,37	38583,7	1198	37385,7
4	HPC	14039,78	140397,8	6896	133501,8
4	Web	20336,95	203369,5	6896	196473,5

10.2. Anàlisi d'implementar el control de reactiva

En aquest segon anàlisi econòmic es presentaran els resultats obtinguts en la confecció de la factura d'un centre de dades quan passa d'estar compensat només amb bancs de condensadors a implementar el llaç de control dissenyat sobre el convertidor costat xarxa de la UPS. L'estudi torna a ser per una banda els estalvis que porten el fer més eficient l'edifici en la facturació bàsica i per l'altre els beneficis que s'extreuen del complement tarifari que es calcula a partir del factor de potència. Al final es farà un balanç amb els principals costos d'implementar el control per veure si el balanç és positiu, s'obtenen beneficis amb aquesta estratègia, o negatiu, genera pèrdues.

Es presenten els resultats del càlcul de la facturació bàsica a la Taula 10.4. Per a veure aquest càlcul més detallat per períodes horaris, s'exposa més detalladament aquest càlcul a l'annex F. En aquesta taula es mostra l'estimació de la factura en un any per a cada TIER i cada tipus de càrrega IT tenint en compte que els resultats d'un dia s'extrapolen a la resta de l'any i considerant els períodes horaris de punta; pla i vall, amb els dies abans esmenats

sencers en horari de vall.

Taula 10.4 Facturació bàsica condensadors vs. condensadors i llaç de control

TIER	TIPUS DE CÀRREGA IT	FACTURACIÓ BÀSICA AMB CONDEN. [€]	FACTURACIÓ BÀSICA CONDEN. I CONT. [€]	ESTALVI FACTURACIÓ BÀSICA [€]
1	HPC	7900,36	7897,46	2,90
1	Web	7215,94	7212,98	2,96
2	HPC	37763,28	37743,58	19,70
2	Web	34395,29	34378,92	16,37
3	HPC	126165,49	126119,66	45,83
3	Web	115042,38	115003,61	38,77
4	HPC	580409,80	580391,26	18,54
4	Web	525746,44	525731,18	15,26

A diferència del cas anterior, en aquest canvi de sistema de compensació de reactiva l'estalvi que es presenta en la facturació bàsica és quasi testimonial, donant llavors que la petita millora de l'eficiència observada té un efecte massa petit en aquest còmput de la factura.

A continuació, a la Taula 10.5, es presenta les bonificacions en la facturació complementària calculada a partir del factor de potència mitjà de la instal·lació. En aquest cas no hi ha recàrrecs gràcies a que els dos mètodes comparats són per a la compensació de la reactiva, però si un canvi en la bonificació a causa de que, en el cas del control al punt de connexió a la xarxa, s'assegura un factor de potència unitat: una bonificació màxima d'un 4%.



Taula 10.5 Bonificació condensadors vs. condensadors i control

TIER	TIPUS DE CÀRREGA IT	BONIFICACIÓ AMB CONDENSADORS [€]	BONIFICACIÓ SENSE COMPENSACIÓ [€]	ESTALVI EN ELS COMPLEMENTS [€]
1	HPC	228,85	315,90	87,05
1	Web	216,74	288,52	71,78
2	HPC	1028,80	1509,74	480,95
2	Web	1016,03	1375,16	359,12
3	HPC	3727,68	5044,79	1317,11
3	Web	3717,49	4600,14	882,65
4	HPC	21892,83	23215,65	1322,82
4	Web	20184,94	21029,25	844,31

En aquest càlcul de l'estalvi en aquest complement tarifari s'observa que és molt més important el benefici que genera aquest control del factor de potència que el que provoca la reducció de les pèrdues en la facturació bàsica. En l'última taula d'aquest apartat, Taula 10.6, es presenta: el sumatori entre els dos estalvis donant per a cada TIER i tipus de càrrega com a l'estalvi total en la factura, el principal cost d'instal·lació que és el sobredimensionat del convertidor en la seva potència nominal (estimat en 100€/KVA) i, mantenint aquesta referència de l'horitzó de 10 anys, es determina un balanç per determinar si hi ha beneficis o pèrdues al canviar l'estratègia de compensació.

Taula 10.6 Balanç econòmic de la opció condensadors vs. condensadors i control

TIER	TIPUS DE CÀRREGA IT	ESTALVI TOTAL [€]		PRINCIPAL COST [€]	BALANÇ ECONÒMIC [€]
		En 1 any	En 10 anys		
1	HPC	89,95	899,5	100	799,50
1	Web	74,74	747,4	100	647,41
2	HPC	500,65	5006,5	800	4206,47
2	Web	375,50	3755,0	800	2954,97
3	HPC	1362,94	13629,4	2300	11329,36
3	Web	921,43	9214,3	2300	6914,26
4	HPC	1341,37	13413,7	17000	-3586,33
4	Web	859,58	8595,76	17000	-8404,24

Com es pot veure a la taula superior, modificar el llaç de control del convertidor per a que compensi de forma dinàmica la potència reactiva al punt de connexió a la xarxa porta a obtenir un balanç positiu pels primers tres TIERS, però un de negatiu pel TIER 4. Pels TIERS que presenten un balanç positiu: el període de retorn és major a l'any i aquest està entre el segon i tercer any. Encara que el període de retorn sigui més alt, el balanç econòmic és positiu i la quantitat que s'estalvia en la factura està al voltant de l' 1% de la facturació bàsica del centre de dades amb només condensadors. Mentre aquesta mesura no comporta grans beneficis econòmics com el salt que s'ha tingut en l'anterior estudi, a mesura que pugem en el TIER i es té una càrrega IT més alta: s'obté uns beneficis cada cop més alts.

Per el TIER 4, el balanç es negatiu i és degut a la seva manera de treballar amb dues branques en paral·lel a mitja càrrega, però cada branca estar dissenyada per a poder suportar tota la càrrega en cas que fos necessari. El fet de treballar amb les línies a la meitat de la potència nominal genera ineficiències en tant que el sistema està massa sobredimensionat. Així com el control de reactiva treballa normalment a la meitat de



potència, el convertidor s'ha de sobredimensionar en el cas que es treballi amb la potència integra de l'edifici per una línia i implementar aquest sobredimensionat a les dues línies. Si es fa passar tota la càrrega per una línia, la inversió en el sobredimensionat dels convertidors és el mateix, però en aquest cas l'estalvi és major i s'obtenen beneficis. Aleshores, s'acusa aquest dimensionat del TIER 4 a la redundància en la línia de distribució i en les UPS fent que aquesta estratègia de control, tot i ser una mica més eficient, no sigui una inversió rentable econòmicament.

11. Planificació temporal i costos

Es mostra a la Figura 11.1 un diagrama de Gantt de la planificació d'aquest projecte amb les dates d'inici de cada fase. En la imatge es veu en color blau la duració de cada fase i en taronja la duració de les subetapes de cada fase principal immediatament superior.

El càlcul dels costos del projecte s'ha realitzat en diferents parts. Per una banda el cost de les hores de treball invertides en aquest estudi, des de la recerca d'informació prèvia per introduir el tema al disseny dels models de centre de dades, a l'anàlisi de l'eficiència i finalment la redacció de la memòria.

Amb la planificació d'aquest projecte, si es consideren 6 hores de treball diàries dels dies laborals, s'estima la inversió en aquest projecte de 575 hores. Si es considera el cost del temps d'un estudiant com a 10€/hora, porta a un cost de 5750 €.

En aquest projecte s'ha utilitzat un ordinador personal on s'ha instal·lat el programari Matlab/Simulink. Si de les 575 hores dedicades a aquest projecte s'utilitzen 450 a l'ús de l'ordinador, portarà associat un cost d'amortització de l'equipament, Taula 11.1.

Taula 11.1. Estimació de l'amortització de l'equipament utilitzat

EQUIPAMENT	VALOR [€]	VIDA ÚTIL [h]	AMORTITZACIÓ [€/h]	ÚS [h]	COST [€]
ORDINADOR PERSONAL	600,00	10000	0.06	450	27

A més, per a aquest projecte s'ha de considerar un cost de llicència del software per la necessitat de la llicència del programa Matlab/Simulink, estimada en 6000€, per a poder realitzar les simulacions. Es fa l'estimació de considerar tota la llicència del programari, encara que a la realitat no seria així. Aquest programa s'utilitzaria per a diferents projectes. No seria una mesura econòmica adquirir el software per a només un projecte. Altre material que s'ha hagut d'obtenir per a la confecció d'aquest treball és una llista de llibres senyalats a



la bibliografia que s'estima el seu valor total en 800€.

A tots aquests costos cal afegir, segons l'article 131 del RGLCAP (*Reglamento General de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas*) [48], el 6 per cent del total en concepte de benefici industrial. És a dir, el 6% de 12577, que és 754,62€.

A la Taula 11.2 es mostra el resum del càlcul dels costos d'aquest projecte incloent-hi el 21% d'IVA.

Taula 11.2. Resum pressupost del projecte

CONCEPTE	COST [€]
Hores de treball	5750
Amortització	27
Llicència Matlab	6000
Llibres i material	800
Beneficis industrials	754,62
Total sense IVA	13331,62
Total amb IVA	16131,26

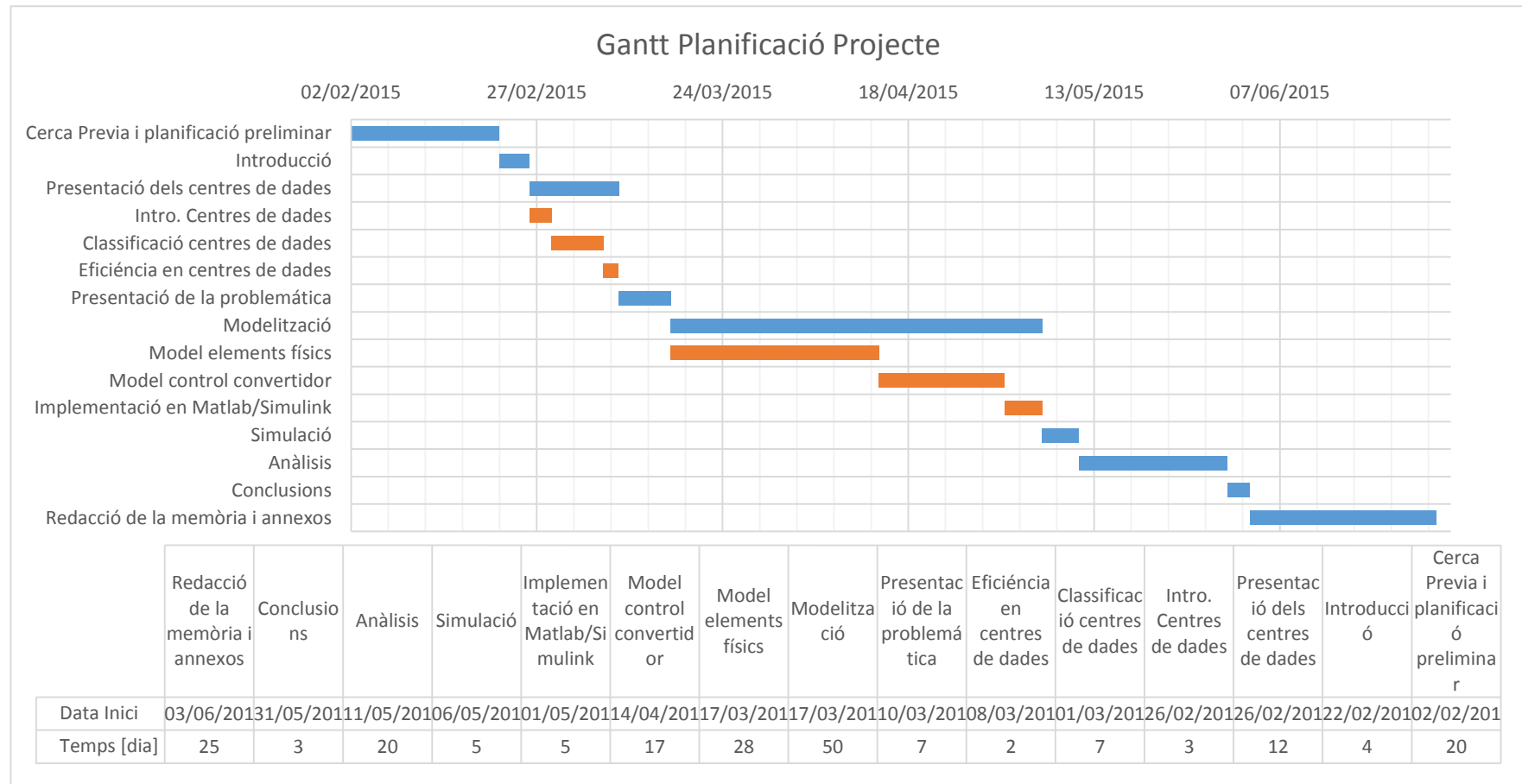


Figura 11.1 Diagrama de Gantt del projecte

Conclusions

En aquest projecte s'ha realitzat una auditoria energètica identificant una oportunitat de millora de l'eficiència en un centre de dades i estudiant-lo en profunditat per determinar si realment i sota quines condicions s'aconsegueix una millora. Per a formular les conclusions d'aquest projecte es repassarà els objectius que s'havien enunciat a l'inici d'aquest document així com també la anàlisi de l'eficiència i la anàlisi econòmic pels diferents casos. Per acabar es determinarà les línies de treball futur per a expandir aquesta recerca.

Entenent com a objectiu principal la hipòtesi de substituir els elements físics de compensació com els condensadors per sobredimensionar el convertidor costat xarxa de la UPS i implementar un control de la potència reactiva, la conclusió a la que s'arriba és que aquest plantejament **no és assolible**. Com s'ha vist al capítol 9. Estudi de la millora en l'eficiència, per els diferents TIERs i càrregues IT, les simulacions solament amb el control de reactiva sempre presenta una eficiència més baixa als resultats obtinguts amb el model amb condensadors.

S'ha comprovat que **la millor eficiència la presenta l'opció de combinar el control amb els condensadors**. Això és cert en totes les combinacions de TIERs i en qualsevol càrrega IT, encara que pel TIER 4 aquesta millora és mínima.

Per valorar l'últim objectiu principal, la viabilitat econòmica, s'han estudiat els tres casos que comporten un salt en l'eficiència, és a dir, el sistema sense elements físics, el sistema amb elements físics i el sistema combinat amb elements físics i control. El benefici que correspon passar del primer al segon sistema comporta un estalvi important sobretot per haver millorat de forma important el factor de potència. En canvi, el salt del segon al tercer sistema és aproximadament un terç de l'anterior, en el cas dels TIERs 1-3, degut a que el salt en el factor de potència és menor. No és així en centres de dades amb una estructura de TIER 4 on, encara que una mica més eficient, presenta pèrdues econòmiques.

Tots els càlculs que s'han exposat són teòrics i sota les condicions dels apartats de modelització. Per tant, seria convenient i inclús necessari comprovar aquestes dades teòriques en un model més aproximat a la realitat amb la corresponent maqueta de centre de dades ajustada al cas concret.

Per acabar i en última instància, el treball futur per a seguir amb aquest estudi es compon en dos objectius. El primer és estudiar com es comportaria aquesta proposta quan s'incorporen altres conceptes per a la millora de l'eficiència com l'estudi d'utilitzar el "bypass" de la UPS en condicions d'operació normal o conceptes tèrmics de l'edifici. El segon com ja s'ha comentat és testear aquest control dissenyat en una maqueta de centre de dades o un edifici real per comparar els resultats obtinguts i comprovar si s'ajusten prou a la realitat..

Agraïments

Aquest projecte no hagués estat possible sense l'ajut i el suport de l'Institut de Recerca en Energies de Catalunya (IREC) que m'ha acollit durant els 5 mesos que ha durat aquest projecte. En concret al meu director, el Dr. Francisco Díaz González, per a sempre estar disposat a estendre'm la mà quan el requeria en busca d'orientació en el treball i per haver confiat en mi en les reunions per a preses de decisions. Al Dr. Oriol Gomis Bellmunt per haver-me plantejat la possibilitat de realitzar el projecte en aquest institut quan vaig acudir a ell exposant-li les meves motivacions a l'hora de realitzar un projecte en la vessant elèctrica i d'energies. Al Dr. Fernando Bianchi pel seu suport i consell en el procés del disseny del llaç de control i a la resta de companys i companyes de l'institut per a propiciar un ambient de treball immillorable.

Finalment vull agrair a la meva família i amics que han estat sempre al meu costat, no només en aquest projecte, sinó en tot el camí en els estudis de grau que m'ha portat fins a aquest treball, ajudant-me i motivant-me quan ho he necessitat als moments difícils.

Bibliografia

- [1] RENEWIT, [<http://www.renewit-project.eu/the-project-data-centres-renewable-energy-tool/>], 28 de juny de 2015]
- [2] RENEWIT, *Deliverable D4.3, Catalogue of advanced technical concepts for Net Zero Energy Data Centres. Draft Version*, 2014 [<http://www.renewit-project.eu/d4-3-catalogue-advanced-technical-concepts-net-zero-energy-data-centres-draft-version/>], 2 de juny de 2015]
- [3] Directiva 2012/17/UE, 13 de junio de 2012, [<http://www.boe.es/doue/2012/156/L00001-00009.pdf>], 28 de juny de 2015]
- [4] ONG, C. –M., *Dynamic simulation of electric machinery using Matlab/Simulink*, New Jersey: Prentice-Hall Inc.,1998, p85-258
- [5] CHOI, J.-H., KIM, J.-H., *A bi-directional UPS with the performance of harmonic and reactive power compensation*, 1997 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Vol.1, 1997
- [6] LIANG, T. J., SHYU, J. L., CHEN, J. F., *High Real Output Power Online UPS System with Built-in Reactive Power Compensation*, 2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol.3, 2001
- [7] MINIMAN, S., *The Data Center: Past, Present and Future*, 2014 [http://wikibon.org/wiki/v/The_Data_Center:_Past,_Present_and_Future], 28 de maig de 2015]
- [8] GENG H., *Data Center Handbook*, Wiley, New Jersey 2015, Primera Edició
- [9] United States Army Research Laboratory [<http://www.arl.army.mil/www/default.cfm?page=493>], 20 de febrer de 2015]



[10] Computer History Museum, [<http://www.computerhistory.org/timeline/?category=cmpnt>, 21 de febrer de 2015]

[11] BARTELS, A., [<http://www.rackspace.com/blog/datacenter-evolution-1960-to-2000/>, 26 de febrer de 2015]

[12] UPTIME INSTITUTE, *Tier Classifications Define Site Infrastructure Performance*, White Paper

[13] THE GREEN GRID, *PUETM: A Comprehensive Examination of the Metric*, White paper #49, 2012

[14] BERKELEY LAB, *Data Center Utilization Report*, [<https://commons.lbl.gov/pages/viewpage.action?pagelId=77826981>, 28 de juny de 2015]

[15] KOOMEY, J. G., *Worldwide electricity used in data centers*. Environmental Research Letters, 2008 [http://iopscience.iop.org/1748-9326/3/3/034008/pdf/1748-9326_3_3_034008.pdf, 20 de juny de 2015]

[16] KOOMEY, J.G., *Growth in Data Center Electricit Use 2005 to 2010*, 2011 [http://www.missioncriticalmagazine.com/ext/resources/MC/Home/Files/PDFs/Koomey_Data_Center.pdf , 20 de juny de 2015]

[17] KRAUSE, P.C., WASYNCZUK, O., SUDHOFF, S. D., *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, Wiley Inter-science 2002, Second Edition, p. 481-510

[18] KAZMIERKOWSKI M.P., BLAABJERG, F., KRISHNAN, R., *Control in Power Electronics, selected problems*, Elsevier Science , San Diego 2002, p. 89-160

[19] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. DEAPRTAMENT D'ENGINYERIA ELÈCTRICA, *Revisión de la teoria de la potencia instantánea*, 2010.

- [20] BOSE, B. K., *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River 2001, p. 56-62
- [21] IPOSIM, [<https://infineon.transim.com/common/>, 25 de març 2015]
- [22] TIPLER, P.A., MOSCA, G., *Física para la ciencia y la tecnología, volumen 2: electricidad y magnetisme/luz*, Editorial Reverté, 6ª Edició, Barcelona 2010, p 829
- [23] RAS, E., *Teoría de líneas eléctricas: de potencia, de comunicacion, para transmisión en continua*, Marcombo Boixareu Editores, 1985,p. 26,29,71-82
- [24] MATHWORKS, *Three-Phase PI Section Line*,
[<http://es.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/threephasepisectionline.html>], 1 de Març de 2015]
- [25] GALAN, J.L., *Sistemas de Unidades Físicas*, Editorial Reverté, 1987, p. 266
- [26] DigSilent PowerFactory v.14.1, base de dades per a cables de baixa tensió
- [27]COMSYS, *Power Quality* [<http://www.comsys.se/solutions/power-quality.html>], 28 de juny de 2015]
- [28] TAJALI, R., *Low Voltage Circuit Breaker Guidelines For Data Centers*, 2002, White Paper [http://www.powerlogic.com/literature/DataCenterCBApplications_05132002.pdf], 10 de març de 2015]
- [29] ABB, *ABB circuit breakers inside LV switchboards*, p. 13
[[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/40a2505a059a1f0e48257a700024aa1d/\\$file/1sdc007103q0202.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/40a2505a059a1f0e48257a700024aa1d/$file/1sdc007103q0202.pdf)], 15 de març de 2015]



- [30] RASMUSSEN, N., *The Role of Isolation Transformers in Data Center UPS Systems*, White Paper 98, APC by Schneider Electric, [\[https://www.insight.com/content/dam/insight/en_US/pdfs/apc/apc-role-of-isolation-transformers-in-data-center-ups-systems.pdf\]](https://www.insight.com/content/dam/insight/en_US/pdfs/apc/apc-role-of-isolation-transformers-in-data-center-ups-systems.pdf), 4 d'abril de 2015]
- [31] ABB, *Centros de datos 4/13*, [\[http://www05.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/a53d14ca3eea7516c1257c4000329fe8/\\$file/Revista%20ABB%204-2013_72dpi.pdf\]](http://www05.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/a53d14ca3eea7516c1257c4000329fe8/$file/Revista%20ABB%204-2013_72dpi.pdf), 5 d'abril de 2015]
- [32] SCHNEIDER ELECTRIC, *Análisis comparativo de los grupos de conexión más importantes*, Curso transformadores de Potencia, [\[http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/171000/FA171237/es_ES/Grupos%20de%20Conexi%C3%B3n.pdf\]](http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/171000/FA171237/es_ES/Grupos%20de%20Conexi%C3%B3n.pdf), 25 de juny de 2015]
- [33] SCHNEIDER ELECTRIC, *Centros de Transformación MT/BT*, 2000, p.30 [\[http://umh2223.edu.umh.es/wp-content/uploads/sites/188/2013/02/04-II-Master-Cuaderno-Tecnico-PT-004-Centros-de-Transformacion-MT-BT.pdf\]](http://umh2223.edu.umh.es/wp-content/uploads/sites/188/2013/02/04-II-Master-Cuaderno-Tecnico-PT-004-Centros-de-Transformacion-MT-BT.pdf), 25 de juny de 2015]
- [34] RAS, E., *Transformadores: de potencia, de medida y de protección*, Marcombo Boixareu Editores, 1994, Espanya.
- [35] EVANS, T., *The diferent Technologies for Cooling Data Centers*, White Paper 59, Schneider Electric.
- [36] YORK, Titan™ Multistage Industrial Chillers, 1997
- [37] VFDs, [\[http://www.vfds.com/blog/what-is-a-vfd\]](http://www.vfds.com/blog/what-is-a-vfd), 28 de juny de 2015]
- [38] EMERSON, *Smart Cooling Solutions Data Center*, [\[http://www.emersonnetworkpower.com/en-EMEA/Products/RACKSANDINTEGRATEDCABINETS/Documents/Knurr%20DCD/Smart-Cooling-Solutions-Data-Center-EN.pdf\]](http://www.emersonnetworkpower.com/en-EMEA/Products/RACKSANDINTEGRATEDCABINETS/Documents/Knurr%20DCD/Smart-Cooling-Solutions-Data-Center-EN.pdf), 26 de juny de 2015]

[39] RAO, P., CROW, M.L., Yang, Z., STATCOM Control for Power System Voltage Control Applications,

[http://www.researchgate.net/profile/ML_Crow/publication/3274003_STATCOM_control_for_power_system_voltage_control_applications/links/0912f50b37f568e9ee000000.pdf], 28 de juny 2015]

[40] SCHNEIDER ELECTRIC, Catàleg VarplusCan [<http://www.schneider-electric.com/products/es/es/4300-correccion-del-factor-de-potencia/4320-componentes-condensadores/60419-varpluscan/?APPLICATION=1023>], 15 de juny 2015]

[41] Akagi H., Watanabe EH, Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2007

[42] DIAZ, F., SUMPER, A., GOMIS, O., VILLAFILA, R., Modeling, control and experimental validation of a flywheel-based energy storage Device, 2012 3rd IEEE International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies

[43] LEGRAND, Data Center Integrated solutions,
[http://www.legrand.com.my/uploads/tx_sbdownloader/Legrand_Data_Center_brochure.pdf], 16 de juny de 2015]

[44] BOIX, O., CÓRCOLES, F., SAINZ, L., SUELVE, F. J., Tecnología Eléctrica, Ediciones Ceysa, Barcelona 2002, p. 77 – 83

[45] BOE núm. 175, 19 de juliol de 2014, pàgines 57158 a 57184
[<http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2014-7658>, 28 de juny de 2015]

[46] BOE núm. 28, 1 de febrer de 2014, pàgines 7147 a 7169,
[http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2014-1052, 28 de juny de 2015]

[47] BOE núm. 42, 18 de febrero de 2006,
[<http://www.boe.es/boe/dias/2006/02/18/pdfs/A06635-06636.pdf>, 28 de juny de 2015]



[48] BOE núm. 257, 26 de octubre de 2001,

[<http://www.boe.es/boe/dias/2001/10/26/pdfs/A39252-39371.pdf>, 28 de juny 2015]